

**UNIVERSIDAD DE PANAMÁ  
FACULTAD DE CIENCIAS AGROPECUARIAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA AGRÍCOLA**

**CUANTIFICACIÓN DE LAS FRACCIONES DEL FÓSFORO  
TOTAL Y DISPONIBLES EN EL SUELO, EN UN SISTEMA  
AGROFORESTAL DE CAFÉ ARBOLADO, EN LA FINCA DOÑA  
AMELIA, JARAMILLO ARRIBA, DISTRITO DE BOQUETE,  
PROVINCIA DE CHIRIQUÍ.**

**STEPHANIE C. MORALES T.**

**4-769-689**

**DAVID, CHIRIQUÍ  
REPÚBLICA DE PANAMÁ**

**2016**

**CUANTIFICACIÓN DE LAS FRACCIONES DEL FÓSFORO  
TOTAL Y DISPONIBLES EN EL SUELO, EN UN SISTEMA  
AGROFORESTAL DE CAFÉ ARBOLADO, EN LA FINCA DOÑA  
AMELIA, JARAMILLO ARRIBA, DISTRITO DE BOQUETE,  
PROVINCIA DE CHIRIQUÍ.**

**TRABAJO DE GRADUACIÓN SOMETIDO PARA OPTAR POR  
EL TÍTULO DE INGENIERÍA EN MANEJO DE CUENCAS Y  
AMBIENTE**

**FACULTAD DE CIENCIAS AGROPECUARIAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA AGRÍCOLA**

**PERMISO PARA SU APROBACIÓN, REPRODUCCIÓN TOTAL  
O PARCIAL DEBE SER OBTENIDO DE LA FACULTAD DE  
CIENCIAS AGROPECUARIAS**

**APROBADO POR:**

**PROF. ALEXIS SAMUDIO**

\_\_\_\_\_  
**DIRECTOR**

**PROFA. FELÍCITA GONZÁLEZ**

\_\_\_\_\_  
**ASESORA**

**PROFA. LILIANA ESCALANTE**

\_\_\_\_\_  
**ASESORA**

**DAVID, CHIRIQUÍ  
REPÚBLICA DE PANAMÁ**

**2016**

## AGRADECIMIENTO

*A mi Dios todo poderoso, que todo lo ve, todo lo escucha, todo lo puede, a Él sean todas las bendiciones.*

*Gracias por darme la fuerza para poder culminar una de mis metas trazada a lo largo de mi caminar, gracias por iluminar mis pasos durante la realización de este trabajo de grado.*

*Gracias a mis padres Eduardo Morales y Milka Torres, que les debo todo lo que he logrado hasta hoy, a mis hermanos Edmily y Eduardo Morales por brindarme su apoyo incondicional.*

*Gracias a George Lohmann, por su apoyo incondicional brindado siempre en todo momento y por ser parte de una de mis metas.*

*Mi agradecimiento sincero a mi director el profesor Alexis Samudio, por la dedicación, solidaridad y enseñanzas brindadas durante todo el transcurso de la realización de la tesis.*

*A mis asesoras la profesora Felícita González y la profesora Liliana Escalante, por su ayuda y orientación; a la Licenciada Yaderit Alvarado, por acompañarme en la etapa de laboratorio y brindarme su ayuda incondicional.*

*Agradecimiento al profesor José Binns, por su contribución en el estudio.*

*Al señor Benancio, por parte de la Finca Lérica, por su contribución en campo. Y a la Finca Lérica, por permitirme realizar el presente estudio en sus fincas.*

*Bendito sea el Señor, mi Roca,  
que adiestras mis manos para el combate,  
Mis dedos para la batalla.*

*Salmos 144:1*

# **CUANTIFICACIÓN DE LAS FRACCIONES DEL FÓSFORO TOTAL Y DISPONIBLES EN EL SUELO, EN UN SISTEMA AGROFORESTAL DE CAFÉ ARBOLADO, EN LA FINCA DOÑA AMELIA, JARAMILLO ARRIBA, DISTRITO DE BOQUETE, PROVINCIA DE CHIRIQUÍ.**

**Morales Torres, S. C. 2016.** Cuantificación de las fracciones del fósforo total y disponibles en el suelo, en un sistema agroforestal de café arbolado, en la Finca Doña Amelia, ubicada en Jaramillo Arriba, distrito de Boquete, provincia de Chiriquí. Tesis ing. Manejo de cuencas y ambiente. Chiriquí, Panamá. Universidad de Panamá. Facultad de Ciencias Agropecuarias. 92 páginas.

## **RESUMEN**

El presente estudio, fue realizado con la finalidad de cuantificar las diferentes fracciones de fósforo existentes en un sistema de café arbolado, con diferentes niveles de sombra y a dos profundidades de muestreo (0-10 cm y 10-20 cm) en la Finca de Doña Amelia, en Jaramillo Arriba en el distrito de Boquete, en un suelo de origen volcánico. Se determinaron las diferentes fracciones de fósforo, mediante la metodología de fraccionamiento secuencial adaptada por el Centro Internacional de Agricultura Tropical, a partir de la técnica modificada por Hedley et al. (1982), Tiessen y Moir (1993). Los resultados del fraccionamiento de los contenidos de fósforo mostraron estadísticamente diferencias altamente significativas en los tratamientos, los cuales fueron: sin sombra, parcialmente sombreado y totalmente sombreado, el tratamiento uno que correspondió a sin sombra presentó los contenidos más altos de fósforo total 2,243.2 partes por millón a comparación del tratamiento tres que corresponde al tratamiento totalmente sombreado con 1,658.2 partes por millón presentando a la vez bajos contenidos de fósforo disponible, moderadamente disponible, residual y total, los cuales se presentan en el cuadro III, por otro lado el tratamiento tres evidencio los más altos contenidos de las fracciones orgánicas de fósforo 712.2 partes por millón, debido al incremento de la materia orgánica proveniente de las hojarascas y residuos vegetales de la asociación de árboles y arbustos que este tratamiento presenta. Para la variable de las profundidades de muestreo de suelo, los resultados estadísticos, mostraron que no existen diferencias significativas, dándose como resultado un contenido mayor de fósforo en los horizontes superficiales, disminuyendo a medida que aumenta la profundidad. En conclusión, existen pocas cantidades de fósforo disponible en el suelo, en relación a la cantidad de fósforo total existente, por lo cual muchas veces se aplican fertilizantes fosfatados para satisfacer los requerimientos nutrimentales del cultivo, y el pH del suelo juega un papel crucial en la adsorción de fósforo en las plantas.

**PALABRAS CLAVES:** Fósforo, fraccionamiento de fósforo, café arbolado, suelos volcánicos, andisol, fósforo total, fósforo orgánico, fósforo inorgánico.

## **QUANTIFICATION OF TOTAL AVAILABLE PHOSPHORUS FRACTIONS ON FLOOR, IN A WOODLAND AGROFORESTAL COFFEE SYSTEM, IN THE FINCA DONA AMELIA, JARAMILLO ARRIBA, DISTRICT OF BOQUETE, CHIRIQUI PROVINCE.**

**Morales Torres, S. C. 2016.** QUANTIFICATION OF TOTAL AVAILABLE PHOSPHORUS FRACTIONS ON FLOOR, IN A WOODLAND AGROFORESTAL COFFEE SYSTEM, IN THE FINCA DONA AMELIA, JARAMILLO ARRIBA, DISTRICT OF BOQUETE, CHIRIQUI PROVINCE. Thesis ing. Watershed and environment management. Chiriquí, Panamá. Universidad de Panamá. Facultad de Ciencias Agropecuarias. 92 pages.

### **ABSTRACT**

The current study was performed in order to quantify the different fractions of phosphorus existing in a wooded coffee system, with different levels of shade and two sampling depths (0-10 cm and 10-20 cm) at the Finca Dona Amelia, in Jaramillo Arriba in the district of Boquete, which have a volcanic soil. The different fractions of phosphorus were determined by the sequential fractionation methodology adapted by the International Center for Tropical Agriculture, based on the modified technique by Hedley et al. (1982), Tiessen and Moir (1993). The results of fractionation of phosphorus contents showed highly significant statistical differences in the treatments, which were unshaded, partially shaded and completely shaded, the treatment one that corresponded to unshaded had the highest content of total phosphorus which were 2243.2 parts per million compared to treatment three corresponding to completely shaded treatment with 1658.2 parts per million, while showing low available phosphorus content, moderately available, residual and total, which are presented in Table III, on the other hand, treatment three evidenced the highest content of organic phosphorus fractions 712.2 parts per million, due to the increased of organic material coming from the leaves trash and vegetable waste from the association of trees and shrubs that this treatment presents. For the variable of soil sampling depths, the statistical results, showed that there are not great differences, giving as a result bigger phosphorus content in the surface horizons, decreasing as depth increases. In conclusion, there are little amounts of phosphorus available in the soil, in relation to the amount of total phosphorus that exists, so often phosphate fertilizers are applied to satisfy the nutritional requirements of the crop and soil, and the pH plays a crucial role in the absorption of phosphorus in plants.

**KEYWORDS:** phosphorus, phosphorus fractionation, wooded coffee, volcanic soil, andosol, total phosphorus, organic phosphorus, inorganic phosphorus.

## ÍNDICE

PÁGINA DE APROBACIÓN .....	ii
AGRADECIMIENTO .....	iii
RESUMEN.....	iv
ABSTRACT .....	v
ÍNDICE .....	vi
ÍNDICE DE CUADROS.....	ix
ÍNDICE DE FIGURAS.....	x
ÍNDICE DE ANEXOS.....	xi
1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Planteamiento del problema.....	2
1.2 Antecedentes .....	3
1.3 Justificación.....	6
1.4 Objetivos .....	7
1.4.1 General .....	7
1.4.2 Específicos.....	7
1.5 Hipótesis.....	7
1.6 Alcances y limitaciones del estudio .....	8
2. REVISIÓN DE LITERATURA .....	9
2.1 Importancia del fósforo en las plantas.....	9
2.2 Fraccionamiento del fósforo .....	10
2.3 Formas de fósforo .....	12
2.4 Fósforo total .....	13
2.5 Fósforo orgánico .....	14
2.6 Fósforo inorgánico.....	16
2.7 Propiedades Físico-Químicas de suelos derivados de ceniza volcánica.....	17
2.8 Fijación y liberación del fósforo .....	19
2.8.1 Mecanismo de fijación del fósforo en andisoles .....	20
2.8.2 Factores que influyen en la disponibilidad de fósforo en suelos volcánicos.....	21

2.9	El cultivo de café .....	23
2.9.1	Botánica .....	23
2.9.2	Especies y variedades .....	24
2.9.3	Factores que Influyen en el cultivo de café .....	24
2.10	Producción de café en Panamá .....	26
2.11	Sistema de café arbolado.....	27
2.11.1	Efectos de los niveles de sombra, temperatura y humedad sobre el cultivo de café. ....	29
2.11.2	Efectos sobre la fertilidad del suelo sobre el cultivo de café.....	30
3.	MATERIALES Y MÉTODOS .....	31
3.1	Definición y localización del área de estudio .....	31
3.1.1	Ubicación y descripción del área de estudio .....	31
3.1.2	Geología y geomorfología .....	32
3.1.3	Zona de vida y vegetación .....	32
3.1.4	Clima.....	32
3.1.5	Descripción y ubicación de las parcelas .....	33
3.1.6	Fertilización de las parcelas .....	38
3.2	Metodología.....	39
3.2.1	Establecimiento de las parcelas de muestreo .....	39
3.2.2	Muestreo y Análisis de suelo.....	40
3.2.3	Cuantificación del fósforo total .....	40
3.3	Parámetros a evaluar .....	45
3.3.1	Fracciones de fósforo.....	45
3.3.2	Análisis de fertilidad del suelo.....	46
3.3.3	Materia orgánica .....	46
3.3.5	Modelo estadístico .....	47
4.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	48
4.1	Análisis de suelo y contenido de nutrimentos.....	48
4.2	Fracciones de Fósforo por tratamiento.....	52
4.2.1.	Fósforo Disponible .....	55
4.2.2	Fósforo moderadamente disponibles .....	57
4.2.3	Fósforo no disponible (Residual).....	59
4.2.4	Fósforo orgánico .....	61

4.2.5 Fósforo total y porcentajes de fósforo orgánico e inorgánico. ....	63
4.3 Efecto de la profundidad de muestreo sobre el contenido de fósforo en las fracciones. ....	67
5. CONCLUSIONES .....	69
6. RECOMENDACIONES.....	71
7. REFERENCIAS CITADAS.....	72
ANEXOS.....	76

## ÍNDICE DE CUADROS

CUADRO		PÁG.
I.	ANÁLISIS QUÍMICO Y FÍSICO DEL SUELO ESTUDIADO...	49
II.	CONTENIDO DE LAS FRACCIONES DE FÓSFORO POR TRATAMIENTO.....	52
III.	ANÁLISIS DE VARIANZA PARA LOS DATOS DE LAS FRACCIONES DE FÓSFORO.....	53
IV.	CONTENIDO DE FÓSFORO EN LAS FRACCIONES A DIFERENTES PROFUNDIDADES.....	67

## ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA		PÁG.
1.	UBICACIÓN DEL SITIO DE ESTUDIO.....	31
2.	PARCELAS DE CAFÉ SIN SOMBRA.....	33
3.	REPRESENTACIÓN DE LA SOMBRA PARCELA SIN SOMBRA.....	34
4.	PARCELAS DE CAFÉ CON SOMBRA IRREGULAR.....	35
5.	REPRESENTACIÓN DE LA SOMBRA PARCELA PARCIALMENTE SOMBREADA.....	36
6.	PARCELAS DE CAFÉ CON SOMBRA DENSA.....	37
7.	REPRESENTACIÓN DE LA SOMBRA PARCELA TOTALMENTE SOMBREADA .....	37
8.	REPRESENTACIÓN DEL DISEÑO DEL ENSAYO.....	39
9.	DIAGRAMA DEL FRACCIONAMIENTO SECUENCIAL DE P DEL SUELO, MODIFICADO POR HEDLEY ET AL. (1982).....	44
10.	FRACCIONES DE FÓSFORO DISPONIBLE.....	55
11.	FRACCIONES DE FÓSFORO MODERADAMENTE DISPONIBLE.....	57
12.	FRACCIONES DE FÓSFORO RESIDUAL.....	59
13.	FRACCIONES DE FÓSFORO ORGÁNICO.....	62
14.	FÓSFORO TOTAL EN LOS DIFERENTES TRATAMIENTOS.....	64
15.	PORCENTAJES DE FÓSFORO ORGÁNICO E INORGÁNICO.....	65

## ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO		PÁG.
1.	MARCACIÓN DE PARCELAS Y MUESTREO DE SUELO.....	76
2.	TAMIZADO Y PESADO DE LAS MUESTRAS .....	77
3.	CUANTIFICACIÓN DE LAS FRACCIONES DE FÓSFORO.....	77
3.1	FÓSFORO EXTRAÍDO EN RESINAS INTERCAMBIADORAS DE ANIONES.....	77
3.2	FÓSFORO EXTRAÍDO EN BICARBONATO DE SODIO...	78
3.3	FÓSFORO EXTRAÍDO EN HIDRÓXIDO DE SODIO.....	79
3.4	FÓSFORO EXTRAÍDO EN ÁCIDO CLORHÍDRICO.....	79
3.5	DETERMINACIÓN DE FÓSFORO RESIDUAL.....	80
3.6	FÓSFORO TOTAL EXTRAÍDO POR MEDIO DE UNA MEZCLA ÁCIDA (NÍTRICO +PERCLÓRICO +SULFÚRICO) POR DIGESTIÓN .....	81

## 1. INTRODUCCIÓN

El fósforo se considera un macronutriente, pese a que su contenido en las plantas es siempre menor que el nitrógeno, potasio y calcio, comúnmente es deficiente en la producción agrícola y los cultivos lo requieren generalmente en cantidades relativamente bajas. Entre las principales funciones del fósforo en las plantas se pueden mencionar: realiza una función clave en la fotosíntesis, la respiración celular y todo el metabolismo energético, tiene función metabólica en la regulación de la síntesis y transporte de hidratos de carbono, favorece el desarrollo de las raíces al comienzo de la vegetación, el fósforo se comporta como elemento móvil que es distribuido fácilmente por toda la planta.

Un factor que facilita la absorción del fósforo es la presencia de micorrizas, los cuales son hongos del suelo que se asocian a las raíces. En los suelos, el nutriente se encuentra presente en formas orgánicas e inorgánicas, a su vez se le conoce como disponible o asimilable a la fracción del fósforo inorgánico del suelo que está más estrechamente relacionada con la absorción por la planta.

Según la clasificación taxonómica de suelos en Panamá, en la provincia de Chiriquí, predominan los suelos ultisoles, alfisoles, inceptisoles y andisoles. En los suelos andisoles, la capacidad de fijación de fósforo se encuentra en un rango de 90 a 95% (Sánchez, 1981), debido a diversos factores, producto

de esto, la cantidad de este elemento en los suelos, es muy deficiente, por estas razones se han realizado aplicaciones de fertilizantes fosfatados, para suplir la necesidad del fósforo en el suelo, la eficiencia de la fertilización fosfatada es de 10 a 30% de la cual representa la proporción expresada en porcentaje utilizada por la planta de la cantidad de fertilizante aplicada (Sánchez, 1891). Una de las características más importante de los suelos andisoles, es su capacidad para inmovilizar el fósforo, y la predominancia de los minerales amorfos como la alofana, haloisita e imogolita.

El sistema de café con sombra en Panamá se desarrolla más en los sectores de tierras altas de la provincia de Chiriquí, siendo el mayor productor de café a nivel nacional; debido a su mejor desarrollo, calidad y producción de café, se desarrolla más en sectores como Boquete y Renacimiento. En el sistema de café con sombra, se incorporan tres componentes principales, la leñosa perenne, el cultivo y el suelo; estos componentes contribuyen a la ganancia directa por la producción de árboles, y la ganancia indirecta por efectos ambientales que benefician al café asociado, al igual que la reducción de insumos, y las diversas ventajas de la asociación del café con árboles.

### **1.1 Planteamiento del problema**

El fósforo es uno de los elementos limitantes más comunes en suelos tropicales, principalmente en los suelos oxisoles, ultisoles, suelos andisoles y vertisoles, esto debido a la alta capacidad de fijación del elemento en el suelo, teniendo en cuenta que el contenido de fósforo total es muy variable en los suelos tropicales, ya que esta se encuentra en función del estado de

meteorización del suelo y de su contenido de materia orgánica. En los suelos del distrito de Boquete que corresponden al orden de suelo andisol, presentan serias deficiencias de este elemento, teniendo en cuenta que estos suelos son deficientes en fósforo por naturaleza, y la alta fijación del elemento, lo cual deja poca disponibilidad para la planta, dentro de las principales causas que originan la fijación de fósforo en estos suelos, es la presencia de fosfatos de aluminio, calcio y hierro, al igual que la acidez que es provocada por el gran contenido de materia orgánica que se genera, otra causa que incide sobre la poca disponibilidad del fósforo en el suelo es la presencia de los minerales como alofana e imogolita, que forman parte de los minerales amorfos presentes en estos suelos, y que tiene una alta capacidad de inmovilizar el elemento en el suelo.

## **1.2 Antecedentes**

La disponibilidad del fósforo en los suelos tropicales es muy reducida, en el caso de los suelos andisoles, tienen una alta capacidad de fijación de fósforo, la cual se encuentra en el rango de 80 a 95% (Sánchez, 1981), actualmente en Panamá no se ha realizado un estudio sobre la cuantificación del fósforo disponible en estos suelos, por lo cual existe poco conocimiento sobre la disponibilidad de este elemento en este orden de suelo, basándonos en la metodología de fraccionamiento secuencial del fósforo, es necesario realizar una investigación, para determinar la dinámica de este elemento.

En 1982, Hedley y Stewart, proponen un fraccionamiento secuencial que intenta examinar a través del análisis del fósforo en extractos de suelos no

solo el fósforo inorgánico, sino también las formas lábiles y más estables del fósforo orgánico en suelos sometidos a diferentes condiciones de incubación y manejo (Negrín, 2005).

Nos indica el mismo autor, que la ventaja de esta metodología es la de brindar un mayor conocimiento del fósforo presente tanto en el pool inorgánico como orgánico, desde el punto de vista de la diferente "labilidad" de sus componentes, y su significado en términos de potencial de paso a formas de alta disponibilidad para las plantas.

González (1997), en estudio en un barbecho mejorado en un ultisol ácido, realiza el fraccionamiento del fósforo en el suelo, mediante la metodología de Hedley (1982), modificada por Macedo en 1996, cuantificando la cantidad de fósforo total, fósforo orgánico, fósforo inorgánico y fósforo microbial, mediante la utilización de diferentes extractantes para estimar las formas disponibles, moderadamente disponibles y recalcitrantes, tanto de compuestos orgánicos como inorgánicos.

Los resultados encontrados en este ensayo, indicaron que el fósforo en las fracciones lábiles en un ultisol ácido pasa rápidamente a fracciones recalcitrantes que no son fácilmente extraídos por la planta. También se observaron que los aumentos de fósforo en las fracciones fueron debido a la aplicación de cal, incrementando el fósforo disponible para la producción de las plantas.

Se estimaron las fracciones orgánicas e inorgánicas de fósforo, encontrando que el sistema de barbecho mejorado aporta al fósforo total un porcentaje mayor de fósforo orgánico que en el ensayo sin árbol, mientras que en las

fracciones inorgánicas son similares para ambos ensayos, se conoció que la fracción de fósforo orgánico en estos suelos altamente fijadores, es de gran importancia porque actúan como depósito de fósforo recirculado (González, 1997).

Mejía (2010), realizó una investigación sobre las fracciones de fósforo en suelos del Valle del Cauca con influencia volcánica, sembrado con café bajo diferentes sistemas de cultivo, mediante el cual evaluó la influencia de la sombra de café bajo los sistemas de cultivo orgánico, orgánico-mineral y convencional, al igual se determinaron las variaciones del contenido de fósforo con respecto a la profundidad del suelo, como resultado se obtuvieron que los contenidos de la fracción orgánica del fósforo disponible y el fósforo moderadamente disponible presentaron diferencias significativas entre los sistemas que incluía el manejo orgánica y el sistema convencional, dando como resultado los más bajos valores en comparación del sistema orgánico-mineral que presentó mayores contenidos de fósforo orgánico e inorgánico, por último el sistema convencional, presento reservas menores de elemento fósforo en el suelo, esto debido a la falta de cobertura para el cultivo de café y la práctica intensiva de monocultivo.

Referente a las diferentes profundidades de muestreo, de 10, 20, y 30 centímetros, se obtuvo como resultado que a mayor profundidad existe mayor variación en cuanto al fósforo total, el cual disminuía en efecto de la profundidad del suelo, concluyendo que el mayor contenido de este elemento se presenta entre los primeros 10 centímetros del suelo (Mejía, 2010).

### 1.3 Justificación

La finalidad de esta investigación, es cuantificar el fósforo total, presente en un sistema agroforestal de café bajo sombra, y determinar su disponibilidad para el sistema, teniendo en cuenta la influencia de la sombra.

Debido a que los andisoles proveniente de cenizas volcánicas presentan en su mayoría, deficiencias de fósforo en el suelo a causa de la acidez producida por el incremento de la materia orgánica y la presencia de los minerales amorfos como son la alofana, imogolita y haliosita; dentro de su mineralogía contribuyen con la inmovilización del fósforo en el suelo, dejando poca disponibilidad a las plantas, al igual que la presencia de fosfatos de aluminio, hierro y calcio que al estar en un complejo de bases presentes en la solución del suelo, tienen alta capacidad de retención de fósforo no disponibles para las plantas.

La implementación de la metodología de fraccionamiento secuencial del fósforo, será de gran importancia agronómica, porque basándonos en esta, se generará información base para futuras investigaciones sobre la disponibilidad del fósforo, en andisoles, cultivados en café bajo diferentes densidades de sombra, al igual sería de gran ayuda para los productores al tomar referencia sobre las aplicaciones de fertilizantes a realizar en el suelo, haciendo uso eficiente de este.

## **1.4 Objetivos**

### **1.4.1 General**

- Cuantificar las diferentes fracciones de fósforo en el suelo en un sistema de café arbolado a diferentes niveles de sombra.

### **1.4.2 Específicos**

- Aplicar la metodología de extracción secuencial de fósforo en un andisol.
- Determinar las fracciones de fósforo en el suelo a dos profundidades de muestreo (0-10 y 10-20 centímetros).
- Evaluar el efecto de la sombra, sobre las diferentes fracciones del fósforo presentes en el suelo.
- Analizar estadísticamente los resultados.

## **1.5 Hipótesis**

**Ha:** Existen diferencias en el contenido de las fracciones de fósforo a diferentes niveles de sombra.

**Ho:** No existen diferencias en el contenido de las fracciones de fósforo a diferentes niveles de sombra.

**Ha:** Existen diferencias en el contenido de las fracciones de fósforo a diferentes profundidades de muestreo.

**Ho:** No existen diferencias en el contenido de las fracciones de fósforo a diferentes profundidades de muestreo.

## **1.6 Alcances y limitaciones del estudio**

La importancia de conocer las diferentes formas de fósforo total presente en el suelo, guarda una estrecha relación con su disponibilidad en la nutrición de las plantas, siendo el fósforo el segundo macronutriente esencial para éstas.

La presente investigación nos permitió obtener datos en campo, que pueden favorecer, aportar información y ayudar tanto a los productores, extensionistas, científicos e investigadores, a conocer las formas disponibles del fósforo en un sistema agroforestal de café arbolado. Cabe destacar que el alcance de la investigación es a nivel nacional y regional, debido a las características de los suelos de origen volcánico.

La principal limitante en el estudio realizado, fue la complejidad de la metodología para el fraccionamiento secuencial de fósforo, ya que debe ser continuo y con el menor grado de error en el laboratorio.

## **2. REVISIÓN DE LITERATURA**

### **2.1 Importancia del fósforo en las plantas**

El fósforo es un elemento fundamental para la nutrición de las plantas, es absorbido en forma de fosfatos mono y diácidos, aunque las plantas lo contienen en menores cantidades que el nitrógeno, potasio y calcio, es considerado un elemento deficiente en el suelo (Sanzano, 2010).

La cantidad total del fósforo en la capa arable varía ampliamente en función del tipo de material parental, las condiciones mineralógicas, el estado de meteorización y los factores de manejo como la fertilización, también influyen en las diferencias de concentración de fósforo en el suelo (Mejía, 2010).

Desde el punto de vista de la nutrición de las plantas, se consideran principalmente tres formas de fósforo en el suelo: fósforo en la solución suelo (fosfato disponible), fósforo adsorbido; es el fosfato retenido en las superficies de partículas con cargas positivas el cual entra en un rápido equilibrio con el fósforo de la solución del suelo, cuando en la solución del suelo hace falta el fósforo, el fósforo adsorbido se libera y pasa a ella. Y por último se encuentra el fósforo fijado, que se denomina el fósforo insoluble, sin embargo puede liberarse y pasar a la forma retenida en las superficies de forma muy lenta (Arias, 2007).

La autora antes citada, describe que el fósforo adsorbido por las células de las plantas rápidamente se involucra en el proceso del metabolismo, el fósforo es un elemento móvil en la planta, y es traslocado principalmente por el floema. Dentro de la planta, el fósforo forma parte de la molécula de adeninatrifosfato (ATP), que es la principal fuente de energía que participa en todos los procesos metabólicos; participa en la fotosíntesis, en la glucólisis, en la respiración, en la síntesis de proteínas y ácidos grasos; forma parte de la cadena estructural del ácido ribonucleico (RNA) el cual participa en la síntesis de la proteína y del ácido desoxirribonucleico (DNA) que es un transportador genético. Otro compuesto de fósforo orgánico es el ácido fítico almacenado en la semilla como reserva de fósforo para la nueva planta durante la germinación. En el proceso de ciclaje y mineralización de nutrimentos, participan las hojas y hojarascas, incrementando la cantidad de fósforo orgánico en el suelo.

## **2.2 Fraccionamiento del fósforo**

El fraccionamiento del fósforo permite examinar a través del análisis del elemento, en extractos de suelos no sólo el fósforo inorgánico, sino también las formas lábiles y más estables del fósforo orgánico en suelos sometidos a diferentes condiciones de incubación y manejo. Mediante este fraccionamiento, los iones fosfatos son extraídos de la disolución del suelo mediante resinas de intercambio aniónico, mientras que las formas de P inorgánico y orgánico se extraen secuencialmente utilizando reactivos y condiciones de agresividad progresiva. Con anterioridad al fraccionamiento

de Hedley (1982), numerosos métodos de extracción y digestión fueron diseñados para cuantificar la cantidad de P disponible para las plantas y el P geoquímicamente fijado (Negrín, 2005).

Macedo (1996), indica que la determinación de una reserva de fósforo en el suelo que sea potencialmente disponible a la planta no es sencillo, puesto que el fósforo en solución reacciona muy rápidamente con la fase mineral del suelo, esto condujo al desarrollo de técnicas de fraccionamiento mediante las cuales se determinan el fósforo lábil y posteriormente las formas más estables de fósforo.

Según Calero., citado por Mejía (2010), expresa que el proceso completo de análisis de fósforo en el suelo comprende dos pasos: extracción del suelo y cuantificación en el extracto. La extracción implica la preparación de una solución extractora, agitación y filtración de la muestra. Para su cuantificación se utiliza un agente reductor. Entre los más frecuentes utilizados se encuentran el cloruro de estaño y el ácido ascórbico con antimonio o bismuto.

Según el estudio realizado por Mejía (2010), expresa que el fraccionamiento de Hedley tiene la ventaja sobre otros diversos métodos, en que la misma muestra es secuencialmente tratada con los diferentes reactivos. Como resultado, se puede establecer la proporción del P lábil, moderadamente lábil y el fósforo ocluido en cada muestra; este como otros procedimientos químicos de extracción secuencial, se utilizan para clasificar el fósforo extraíble del suelo, teniendo en cuenta que el fósforo fácilmente disponible será removido primero con extractantes suaves, mientras que las fracciones menos disponibles pueden ser extraídas solamente con ácidos más fuertes.

### 2.3 Formas de fósforo

Las formas de fósforo en el suelo evolucionan de acuerdo al origen del mismo y a la edad. En la primera etapa de desarrollo del suelo, se encuentran fósforo en su forma de minerales primarios ligados al calcio (principalmente apatita). A través del tiempo el mismo se disuelve lentamente por los procesos de meteorización. El fósforo no ocluido o disponible para las plantas y los microorganismos, corresponde mayormente a la forma inorgánica, ya sea su forma mineral primaria ( $\text{H}_2\text{PO}_4^-$ ) o secundaria ( $\text{HPO}_4^{2-}$ ) y el ion ortofosfato. La concentración de estos iones en la solución de suelo depende del pH. En suelos ácidos domina el  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$ , mientras que el  $\text{HPO}_4^{2-}$  domina en un rango de pH de 6 a 7; dentro de la parte no ocluida se encuentra una pequeña porción de fósforo orgánico fácilmente mineralizable (Araúz, 2013).

Según Negrín (2005), la existencia de diferentes formas de fósforo está condicionada por los procesos edáficos que afectan su disponibilidad; de esta manera, una gran variedad de procesos biológicos y geoquímicos interactúan para controlar la cantidad de fósforo disponible en el suelo. Las cantidades y formas en las que el fósforo puede presentarse, están condicionadas por el factor de formación del suelo.

El autor antes citado, expresa que la clasificación más simple de las formas de fósforo en el suelo, se presentan por la fracción total de fósforo, que a su vez se subdivide en la fracción inorgánica que se encuentra asociado a la naturaleza mineral y la orgánica asociado a la materia orgánica del suelo.

Mejía (2010), en su estudio nos expresa que la disponibilidad de las fracciones orgánicas e inorgánicas, está condicionada por reacciones fisicoquímicas y biológicas y a su vez factores físicos, químicos y biológicos.

Hay factores como la textura, que determinan el contenido de fósforo total, entre más fina es la textura del suelo, mayor es el contenido de fósforo total, por lo cual al disminuirse la profundidad del perfil, disminuye el contenido de materia orgánica y los fosfatos inorgánicos.

La autora antes mencionada, nos indica que solo las fracciones inorgánicas y orgánicas solubles y lábiles están disponibles para las plantas durante el ciclo del cultivo, a su vez el fósforo inorgánico están representados por el fósforo nativo presente en los minerales primarios (apatitas), fósforo adsorbido en las arcillas (lábil), y fósforo ( $\text{HPO}_4^{-2}$  y  $\text{H}_2\text{PO}_4$ ) en la solución del suelo, asimilable por las plantas. En cuanto al fósforo orgánico, se forma de residuos vegetales, animales y microorganismos, estos son encontrados en el humus del suelo, esta forma de fósforo es importante ya que sus altas proporciones pasan a ser disponibles para las plantas a través de la mineralización, mediante la actividad microbiana, y es fundamental en el reciclaje, ya que, se libera fósforo inorgánico en la solución del suelo, lo cual contribuye a la disponibilidad de fósforo para las plantas.

## **2.4 Fósforo total**

Macedo (1996), indica que el contenido de fósforo total en el suelo es relativamente bajo en comparación con otros macronutrientes. En el trópico

los contenidos de fósforo total tienen una variación de 18 mg P/Kilogramo de suelo en oxisoles y ultisoles hasta 3300 mg P/Kilogramo de suelo, el último caso se presenta en suelos derivados de ceniza volcánica de América Central, presentan ese contenido de fósforo total en los suelos, debido a su evolución pedológica y el contenido de materia orgánica.

González (1997), especifica que el fósforo total en la capa arable disminuye conforme aumenta la intensidad de meteorización, y que los suelos jóvenes derivados de cenizas volcánicas presentan un mayor contenido de fósforo total que los desarrollados de sedimentos meteorizados y re-depositados en las áreas bajas tropicales. Y a su vez nos indica que en los suelos oxisoles, ultisoles y anfisoles presentan un valor de fósforo total inferior a 200 partes por millón, mientras que los andisoles, presentan entre 1,000 y 3,000 partes por millón de fósforo total en el suelo.

## **2.5 Fósforo orgánico**

Sánchez (1981), expresa que el fósforo orgánico generalmente corresponde del 20 por ciento al 50 por ciento, del fósforo total en la capa arable. En los suelos oxisoles, ultisoles y alfisoles más altamente meteorizados a menudo representan del 60 por ciento al 80 por ciento del fósforo total del suelo. Diversos investigadores consideran que el fósforo orgánico es la fuente principal del fósforo para la agricultura sin fertilizantes. La importancia de conservar la materia orgánica es también función del mantenimiento del

fósforo orgánico, particularmente en suelos en que la mayor parte del fósforo está en esta forma.

Según Whalen y Sampedro, citado por Araúz (2013), las fracciones de fósforo orgánico representa cerca del 50 por ciento del fósforo en el suelo, dependiendo del material parental y el proceso de pedogénesis. Esta forma de fósforo orgánico, corresponde al fósforo que ha sido absorbido por las plantas por medio de procesos biológicos.

En suelos de América Central, los cuales presentan un cierto grado de acidez, predominan fosfatos de hierro y aluminio, la fracción orgánica el cual contribuye con un 25 por ciento del fósforo total, mientras que en suelos con predominancia de fosfatos de calcio, alcanza un promedio de 41 por ciento (González, 1997).

Salas (1987), expresa que la mineralización del fósforo orgánico es a menudo difícil de cuantificar, debido a que los iones  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$  pueden fijarse en compuestos inorgánicos.

Existen diversos factores que afectan el contenido del fósforo orgánico en el suelo, como es el pH del suelo, el tipo de cultivo, el drenaje de los suelos, también se considera como un factor el contenido de fósforo inorgánico del material parental (Macedo, 1996); González (1997), describe que tanto la temperatura, el grado de acidez del suelo, la actividad biológica, al igual que el grado de desarrollo de los suelos y la precipitación pluvial, son factores que participan en la determinación de los componentes orgánicos en el fósforo total.

## 2.6 Fósforo inorgánico

Las formas sólidas de fósforo inorgánico por lo general se dividen en tres fracciones activas y dos relativamente inactivas. Las fracciones activas pueden agruparse en fosfatos enlazados a calcio, fosfatos enlazados a aluminio y fosfatos enlazados a hierro, mientras que las fracciones relativamente inactivas son las formas ocluidas y aquellas que se disuelven con la reducción química del suelo. Las formas de fósforo inorgánico presentes en el suelo, dependen de su etapa de meteorización química, en los suelos donde la meteorización es elevada, la mayor parte del fósforo inorgánico está en forma ocluida o soluble en reducción debido a la formación de revestimiento de óxidos de aluminio o de hierro (Sánchez, 1981); por otra parte se describe que en los suelos ultisoles predominan los fosfatos de hierro y de aluminio.

Mejía (2010), indica que las plantas absorben el fósforo casi exclusivamente en la forma inorgánica presente en la solución del suelo. De esta manera la demanda nutrimental del cultivo se satisface con el fósforo inorgánico disuelto por poco tiempo durante la etapa de crecimiento.

En el estudio realizado por González (1997), expresa que existen varias formas de fosfatos inorgánicos en los suelos: los constituyentes de minerales fosfatados, fosfatos absorbido a la fracción mineral u orgánica del suelo y el fosfato en solución; entre los fosfatos inorgánicos se diferencian compuestos químicamente bien definidos o cristalizados y no bien cristalizados o amorfos. Al igual expresa que en los suelos ácidos el fósforo se encuentra asociado a

Al o Fe, como los son:  $\text{Al}(\text{OH})_2 \text{H}_2\text{PO}_4$  (Variscita),  $\text{Al}(\text{OH})_3(\text{PO})_2$  (Wavelita),  $\text{FePO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  (Estrengita),  $\text{Fe}_3(\text{PO}_4)_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$  (Vivianita).

Según expresa Fassbender, citado por González (1997), se deben tener en cuenta formas químicas no bien definidas o amorfas como es el caso de los fosfatos absorbidos al complejo coloidal y ocluidos en los hidróxidos de Al, Fe y Mn a través de su proceso de cristalización y desarrollo.

## **2.7 Propiedades Físico-Químicas de suelos derivados de ceniza volcánica.**

Según Lizcano, et al. (2006), la mineralogía de los suelos de ceniza volcánica tiene gran importancia sobre sus características y su comportamiento mecánico, los minerales de arcilla predominantes, son la alofana, imogolita y haloisita, que son derivados de la meteorización de las cenizas volcánicas, en particular provenientes del vidrio volcánico, estos minerales poseen propiedades como el tamaño, forma, carga eléctrica y energía superficiales, que los hacen distinguibles de los minerales comúnmente encontrados en suelos sedimentarios.

El autor citado anteriormente, indica que el mineral alofana, es un aluminosilicato hidrato producido en etapas tempranas de la meteorización del vidrio volcánico, a partir de soluciones de Si y Al, con pH mayores a 4.7; la composición de este mineral varía de acuerdo con el predominio de Al y Si, la alofana presenta una estructura ordenada que consiste de esferas huecas con diámetros externos entre 3.5 y 5 milímetros formando agregados de diámetros de 0.01-1 micrómetros, las cuales se unen para formar

agregados de mayor tamaño de 1-100 micrómetros, la presencia de alofana, está relacionada con la presencia de imogolita, el cual conecta con las partículas de alofana, el mineral imogolita, presenta propiedades químicas similares a la alofana, solo difiere en su formación, a partir de soluciones con relaciones Al/Si que va de 0.5 a 1.0 y un pH de 5.0.

Por otro lado, la haliosita se forma por la alteración avanzada del vidrio volcánico, la cual presenta una estructura similar a la caolinita, formada por una capa octahedral y una capa tetrahedral separadas por una capa de moléculas de H<sub>2</sub>O, cuando se encuentra completamente hidratada, la haloisita producida a partir de material volcánico presenta una morfología tubular o esferoidal con diámetro entre 0.04 y 1 micrómetros.

Lizcano (2006), también expreso que los suelos derivados de ceniza volcánica tienen una estructura muy porosa conformada por agregaciones aleatoriamente distribuidas de tamaño limo y minerales de la fracción de arcilla. La cementación es producida por minerales de arcilla como la alofana, imogolita, haloisita y ferrihidrita o los compuestos de humus y Al/Fe y opalina silíceas; estos minerales son producidos principalmente por la alteración de vidrio volcánico, feldespatos, anfíboles y piroxenos. Se conoce que la interacción de la superficie de los minerales de arcilla con iones disponibles en los fluidos tiene gran importancia sobre el comportamiento físico-químico de los suelos, a su vez estos iones permiten conocer la carga eléctrica de la superficie de las partículas, el cual se utiliza la capacidad de intercambio catiónico, como la medida de la carga negativa o cantidad total de cationes adsorbidos en la superficie de las partículas bajo las condiciones de pH,

temperatura y presión, por otra parte la alofana, haloisita e imogolita, desarrollan cargas eléctricas que dependen del pH.

## **2.8 Fijación y liberación del fósforo**

Sánchez (1987), define la liberación del fósforo como un proceso que altera la disponibilidad de los compuestos fosfatados conforme lo indica el crecimiento de la planta, este proceso consiste en la transformación de fosfatos monocálcicos solubles o superfosfatos, en fosfatos menos solubles dentro de la solución del suelo, por un periodo de año. Los suelos andisoles, que son derivados de materiales parentales volcánicos, debido a su alto contenido de aluminio amorfo, tienen una alta capacidad de fijación de fósforo.

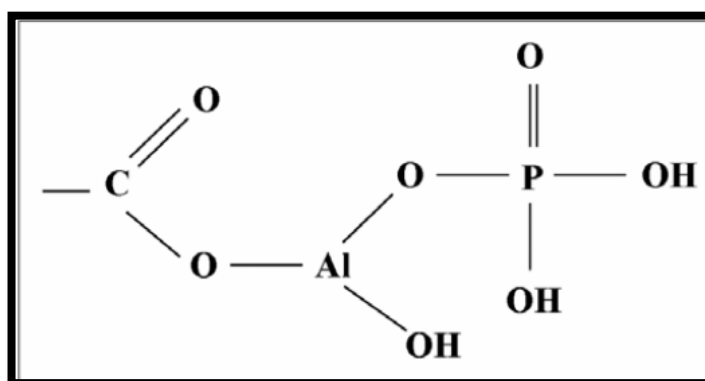
El autor antes citado describe que la mineralogía de los suelos determina el producto de la fijación del fósforo; en suelos con mineralogía oxidica, la mayor parte del fósforo se fija como fosfatos de hierro, en familias caoliníticas la forma predominante es fosfatos de aluminio, en las familias alofánicas la fijación es principalmente en forma de fosfatos de aluminio debido al alto contenido de óxidos de aluminio y al bajo contenido de óxidos de hierro en andisoles ácidos.

En la liberación de fósforo, se expresa que las plantas usan iones de fosfatos en la solución del suelo, la concentración de iones de  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$  son de fracciones de parte por millón; se conoce que el fósforo fijado se libera lentamente en la solución del suelo, en función de la solubilidad de los componentes inorgánicos, igualmente mediante la mineralización del fósforo

orgánico se fija  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$  en la solución del suelo. Las principales familias fijadoras de fósforo son las oxídicas y alofánicas, seguidas por suelos con mezclas de caolinita y óxidos, y por último las familias caoliníticas y montmoriloníticas (Sánchez, 1981).

### 2.8.1 Mecanismo de fijación del fósforo en andisoles

Según Espinosa (2006), se consideró inicialmente que la fijación de fósforo solo ocurría en las superficies activas de la alofana y la imogolita. Los mecanismos de fijación de fósforo en la alofana e imogolita incluyen procesos como quimiadsorción, desplazamiento de silicio (Si) estructural y precipitación; no obstante se han reconocido la importancia de los complejos humus-Al en este proceso. La fracción humus en andisoles forma fácilmente complejos con metales como el Al. El carbono (C) atrapado en estos complejos es inactivo y deja de ser parte del C activo de la fracción orgánica. Por otro lado, los grupos hidroxilo combinados con Al acomplejado entran en reacciones de intercambio ligados con  $\text{HPO}_4^-$  y  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$ .



Representación de la fijación de fósforo en los complejos humus-Al. Fuente: Espinosa (2006). Suelos volcánicos, Dinámica del fósforo y producción de Papa.

De igual manera, el acomplejamiento del Al con el humus limita la posibilidad de coprecipitación de Al con Si, liberados de la descomposición de la ceniza volcánica, lo que a su vez limita también la formación de alofana.

Por otra parte Espinosa (2006), sustenta que la acumulación de humus es mayor en suelos volcánicos localizados a mayor altitud, con lo que pudo concluir que la fijación de fósforo está estrechamente relacionada con el contenido de C en el suelo (complejos humus-Al). Lo cual indicaría la formación de minerales arcillosos a partir de la ceniza volcánica en determinadas condiciones y la intensidad de fijación de fósforo, por lo cual los suelos alofánicos tienden a fijar menos fósforo.

### **2.8.2 Factores que influyen en la disponibilidad de fósforo en suelos volcánicos.**

Según Undurraga (2004), se conoce que el contenido de fósforo disponible en el suelo, está influenciado por las propiedades del suelo, la planta y las condiciones ambientales. En el caso de las plantas, estas poseen sistemas radiculares, las cuales afecta sensiblemente la capacidad de extracción de fósforo por las raíces, dependiendo de la especie, longitud y densidad de los pelos radiculares.

De igual forma Undurraga (2004), nos expresa que dentro de los factores relacionados al suelo, que afectan la disponibilidad del fósforo, se encuentran la acidez del suelo, la cual describe que el rango óptimo de pH de 6.5 y 7.5 se observa una alta disponibilidad del fósforo, debido a la máxima solubilidad

de las formas de fósforo inorgánico del suelo; en los rangos de pH ácido hasta 6.5, se reduce la solubilidad de fosfatos de hierro y aluminio, aumentando la solubilidad de las formas ligadas al calcio, al pasar de un pH ácido a uno alcalino mayor de 7.5 se precipitan las formas de fosfatos de calcio y se reduce la disponibilidad del fósforo en el suelo.

Otro factor que nos expresa el autor antes citado, es el contenido de materia orgánica, la cual presenta cargas negativas, dando como resultado que los ácidos orgánicos formen cationes hidroxilados tales como  $\text{Fe}(\text{OH})_2$  y  $\text{Al}(\text{OH})_2$  producto de estas combinaciones se inmovilizan los iones, liberando iones fosfatos. La relación sílice/sesquióxidos, también es otro factor que influencia la disponibilidad de fósforo, según la naturaleza mineralógica de los suelos, estos varían en su contenido de silicio, hierro y aluminio, la baja relación de sílice ( $\text{SiO}_2$ ) y sesquióxidos ( $\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{Al}_2\text{O}_3$ ) en estos suelos, están generalmente más intemperizados y por lo tanto contienen más hierro y aluminio libres que inmovilizan los fosfatos del suelo, al incrementar esta relación, se aumenta el fósforo disponible.

El aumento del agua en el suelo, induce a un incremento de iones fosfatos en solución, esto ocurre principalmente por las lluvias o por los efectos de riego, se encuentra ligado a las características de las formas inorgánicas de fósforo presentes, en el suelo (P-Ca, P-Fe, P-Al), el cual tiene una naturaleza cristalina relativamente insoluble, posee variables constantes de productos de solubilidad, la cantidad de iones fosfatos aumenta si se incrementa la cantidad de agua en la solución del suelo (Undurraga, 2004).

El último factor que tiene influencia sobre la disponibilidad de fósforo en el suelo, se encuentran los fertilizantes fosfatados, la aplicación de un fertilizante fosfatado, después de varios días desde su aplicación a un cultivo, aplicación posterior fosfatada origina cambios mínimos debido al equilibrio que se genera entre los fosfatos solubles y el fósforo fijado; la disponibilidad del fósforo se incrementa debido a la adición de fertilizantes fosfatados, y la remoción de fósforo de la solución afectada por las plantas, es reemplazada rápidamente por el fósforo fertilizante. La aplicación de fertilizantes fosfatados al suelo, origina una reacción rápida en la superficie de los minerales arcillosos, generando adsorción y luego una reacción lenta de difusión de fósforo que predomina hacia el interior de las partículas, generándose por último la fijación de este elemento en el suelo (Undurraga, 2004).

## **2.9 El cultivo de café**

### **2.9.1 Botánica**

La planta de café es una dicotiledónea, proviene de un arbusto perenne que pertenece a la familia de las *Rubiaceae*, que constituye el género *Coffea*, esta planta puede alcanzar hasta 10 metros de altura de forma silvestre y en una plantación controlada de café alcanza 3 metros, lo que facilita su cosecha. Esta familia comprende alrededor de 500 géneros y más de 6,000 especies (Temis, et al 2011).

Coste (1996), expresa que la vida del cafeto comprende tres grandes periodos. El primero, el de crecimiento, comienza con la germinación de la

semilla y termina en la edad adulta; éste comprende, según las especies y según las condiciones del medio, de cuatro a siete años. El segundo período, es el de producción, es el cual es el más largo, ya que se establece en quince o veinte años, a veces más. El último período es el de decadencia fisiológica el cual termina con la muerte del arbusto.

### **2.9.2 Especies y variedades**

Las dos especies que son de importancia comercial son: *Coffea arabica* Linn y *Coffea canephora*; las cuales son conocidas en el comercio respectivamente, como Arábica y Robusta. La especie de café *Coffea arabica* representa aproximadamente el 80 a 90 por ciento de la producción mundial; las dos variedades originales son conocidas como *C. arabica* var. *Arabica* y *C. arabica* var. *Bourbon*. Mientras que la especie *C. canephora* representa un 20 por ciento de la producción mundial, esta incluye variedades *C. canephora* var. *Kouilouensis*, *C. canephora* var. "Nganda" y *C. canephora* var. "Niaouli" (Temis, A. et al, 2011).

### **2.9.3 Factores que Influyen en el cultivo de café**

Coste (1969), describe que la existencia de factores ecológicos (clima, suelo, etc.), ejercen una influencia muy notable sobre el cafeto, hasta el punto que no es posible su cultivo, si no cumple con ciertos números de condiciones. La sensibilidad del cafeto a alguno de estos factores es tal, que se les puede

considerar como factores vitales limitantes; estos se clasifican en factores climáticos y factores edáficos. Los factores climáticos que afectan al cultivo de café son la temperatura, a bajas temperaturas ocasionan trastornos fisiológicos que repercuten en el crecimiento y la fructificación, y a elevadas temperaturas aumenta la deshidratación de los tejidos, ocasiona marchitamiento en los follajes, las temperaturas altas también resultan nefastas especialmente si la atmósfera es insuficientemente húmeda; las hojas caen, las porciones terminales de las ramas y las yemas se marchitan y mueren.

Otro factores que nos expresa Coste (1969), que afecta el desarrollo del café, es el agua (la precipitación, la humedad atmosférica y agua proporcionada por el rocío), la iluminación juega un papel importante en el desarrollo del café, ya que el hábitat natural del cafeto se halla en lugares sombríos o semi-sombreados, su comportamiento ante la luz ha hecho que durante mucho tiempo se le considere como una planta heliófoba exigiendo en la plantación un cubierto más o menos denso. Otro factor a destacar dentro de los factores climáticos se encuentra la ventilación, por lo general los vientos son nocivos para el cafeto por producir rotura de ramas, caídas de hojas, etc.

Mediante la implementación de café sombreado artificial o natural, se proporciona una corrección de los factores ecológicos, contra la excesiva iluminación, protección de los cafetos contra los descensos de temperatura en regiones de elevada altitud y en las regiones secas, brinda la posibilidad de mantener un índice de humedad más elevado (Coste, 1969).

Nos dice el mismo autor, que en el factor edáfico, las únicas características del suelo, que son de mayor relevancia son la textura y la profundidad del suelo, ya que el cafeto posee un sistema radicular que alcanza gran extensión, estando en presencia de suelos compactados o pocos profundos, el tallo queda corto, y las raíces no se extienden más que en los horizontes superficiales.

### **2.10 Producción de café en Panamá**

La provincia de Chiriquí, es la mayor productora de Café a nivel nacional, seguido por la provincia de Coclé, Bocas del Toro, Panamá y Guna Yala, siguiendo las demás provincias y Comarcas de la república, dando como resultado un total de 16, 454,100 kilogramos de café pilados a nivel nacional, de los cuales en Chiriquí, se produjo 12, 770, 000 kilogramos, según el Instituto Nacional de Estadística y Censo (INEC, 2015).

Según datos recientes del (INEC, 2015), el total de hectáreas ocupadas con árboles de café en la provincia de Chiriquí, tomando en cuenta la variedad de café y el total de árboles y total hectáreas que corresponde, distribuyéndose de la siguiente manera: variedad Catimor, se encuentran sembrados 765,100 árboles de café, en un total de 250 hectáreas de terreno, la variedad Catuay posee 9,629,900 árboles en 2,730 hectáreas, la variedad Caturra 8,838,100 árboles de café en 2,650 hectáreas, variedad Costa Rica 413,100 árboles en 110 hectáreas, la variedad Criollo 1,748,700 árboles en un total de 740 hectáreas, la variedad Geisha 817,900 árboles en 330 hectáreas, variedad Mondo Novo se encuentran establecidos 116,000 árboles de café en 40

hectáreas de terreno y existen la categorías de otras variedades que representan un total de 645,000 árboles en 170 hectáreas de terreno.

Las principales zonas de producción en la provincia de Chiriquí, son las áreas de Boquete, Volcán y Renacimiento, con altitudes que van desde 1,000 hasta 2,500 metros sobre el nivel del mar, registrándose la actividad cafetalera en esta provincia a partir de 1894, datos del (Ministerio de Desarrollo Agropecuario (MIDA, 2011)); por su parte la variedad Geisha, ha logrado captar la atención internacional y de la caficultura panameña, por su calidad y excelencia; dentro de las especies de café que se destacan en la provincia de Chiriquí, se encuentra las variedades Caracolillo, Catimor, Catuay, Caturra, Costa Rica, Criollo, Geisha, Robusta mejorado, entre otros.

### **2.11 Sistema de café arbolado**

El sistema de café arbolado, es un sistema agroforestal, en la cual existe una interacción entre el componente arbóreo o leñoso perenne, el cultivo asociado (café) y el componente suelo, es beneficioso por su alto ciclaje de nutrimentos.

Mushler (1999), expresa que el cultivar café “bajo sombra” no significa solamente dar sombra y reducir el estrés ambiental para el cafeto, significa también que los árboles modifican el ambiente para el café mediante sus raíces, ramas y hojas. Los efectos ambientales de árboles se pueden dividir en dos grupos, el primero son los efectos directos que tienen consecuencias inmediatas para el crecimiento y la producción de los cafetos en asocio, y el

segundo grupo son los efectos indirectos que están en función de los cambios de microclima y cambios a largo plazo en la fertilidad del suelo.

Un elemento característico importante del café orgánico, es el uso tradicional de árboles de sombra, que no sólo protegen las plantas contra un exceso de calor, sino que proporcionan los sistemas microbiológicos necesarios para una resistencia natural contra la erosión y las plagas (Boyce, 1994).

El autor antes citado, describe tres tipos de asociaciones dentro del sistema de café con árboles, el primero es el café asociado con árboles maderables, dentro de las especies más utilizadas maderables son el *Inga ssp*, *Gliricidia sepium*, *Jacaranda caucana*, *Astronium graveolens*, *Tabebuia rosea*, *T. guayacan* y *Cordia spp*, dentro de este asocio es importante tener en cuenta la estructura, tipo de manejo y las fuentes de ingresos de los propietarios. En el asocio de café con árboles para propósitos múltiples, se dan los bienes y servicios, como son las sombras, leña, frutas y producción de miel, las especies más utilizadas son *Erythrina spp*, *Citrus spp*, *Inga spp*, *Gliricidia sepium*, *Mangifera indica*, *Pithecellobium dulce*, *Spondias purpurea*, *Psidium guajaba*, *Annano muricata*, *Annona spp*, *Pseudosamanea guachapele*; los cafetales con variedades mejoradas se combinan con sólo una o dos especies, mientras que en cafetales con variedades tradicionales se combinan con un número grande especies arbóreas. Y por último, se encuentra el asocio de café con todo tipo de árboles, el cual es un sistema de producción diversificado de forma tradicional.

### **2.11.1 Efectos de los niveles de sombra, temperatura y humedad sobre el cultivo de café.**

En un sistema integrado de árboles con café, primeramente se percibe la sombra de los árboles, en función de ella, las temperaturas en el día son más bajas y la humedad relativa es generalmente más alta. Por otra parte el grado de modificación micro climática depende de la intensidad y sombra que producen los árboles y también de las condiciones climáticas en las cuales se encuentra el cafetal (Muschler, 1999).

Nos continua diciendo el mismo autor que las sombras pueden ser homogéneas y la heterogénea, la primera es la que se encuentra en cafetales donde las copas de los árboles se tocan; bajo este dosel cerrado los cafetos son protegidos de cambios abruptos y pueden beneficiarse de efectos indirectos de los árboles, sin embargo si las copas de los árboles son demasiadas cerradas, no permite la entrada suficiente de luz solar, a los cafetos. Mientras que la sombra heterogénea, es cuando existen parches de sombras y parches de luz solar en un cafetal, debido al espaciamiento de las copas de los árboles dentro del cafetal.

#### **2.11.1.1 Tipos de sombra**

Existen tipos de sombra como es la sombra provisional, temporal y definitiva o permanente; la provisional es aquella que se utiliza para proteger al cafeto, durante el primer año de establecido el cafetal, en la sombra temporal son elegidas plantas por su duración y rápido crecimiento que brindan sombra al café durante los primeros cuatro años de establecida la plantación, mientras que la sombra definitiva, es aquella en que las plantas por sus hábitos de

crecimiento y longevidad, conviven con los cafetales, proporcionándoles sombra durante todo el ciclo productivo (ANACAFÉ, 2007).

### **2.11.2 Efectos sobre la fertilidad del suelo sobre el cultivo de café.**

Los principales efectos de los árboles, se observan a largo plazo sobre las propiedades del suelo, se expresa a la vez que el mantenimiento de niveles altos de materia orgánica es uno de los factores principales, tanto por su rol de mantener la estructura del suelo, como por su importancia como fuente y sustrato de nutrimentos. Mientras que algunos efectos de los árboles a través del suelo se notan a corto plazo como es la reducción de la temperatura del suelo y el aumento de la humedad, muchos tienen un impacto marcado solamente después de años o décadas, dentro de estos se pueden mencionar el incremento del contenido de la materia orgánica o del carbón y de la capacidad de intercambio catiónico del suelo bajo mayores niveles de sombra, a su vez se incrementa la fertilidad del suelo, después de la degradación de la materia orgánica de los árboles, luego de ser eliminados o raleados por completo (Muschler, 1999).

Cabe destacar que los árboles también pueden tener efectos negativos para el cultivo a nivel del suelo, como es el aumento de la acidez del suelo por la absorción de bases, la acumulación de sustancias tóxicas de características alelopáticas para el cultivo en el suelo, y la competencia con el cultivo por agua y nutrimentos. (Rao et al. Citado por Muschler, 1999).



### 3.1.2 Geología y geomorfología

Según el Instituto Geográfico Nacional Tommy Guardia (IGNTG; 2007), la característica geológica del área de estudio, dentro del distrito de Boquete, es del periodo cuaternario, con formaciones volcánicas de basalto, andesitas, cenizas, tobas, lavas y tobas del periodo terciario. En cuanto a la geomorfología, el área de estudio es de morfo cronología cuaternaria antiguo y medio, y tercio, con formas de explayamiento hidro-volcánico, con presencia de rocas sedimentarias como la caliza, lutita, conglomerados, areniscas entre otras rocas, presentes en el área de estudio.

### 3.1.3 Zona de vida y vegetación

La finca Doña Amelia, se encuentra en la zona de vida de bosque muy húmedo pre-montano (bmh-P), según Holdridge (IGNTG, 2007).

En cuanto a la vegetación, en el área predominan los bosques, algunas especies encontradas en esta zona de vida son: *Laplacea*, *Brunellia*, *Brosium*, *Ficus*, *Taonaba*, *Ouratea*, *Vochysia*, *Protium*, *Cupania*, *Ladenbergia*, *Rapanea*, *Alchornea*, *Vitex*, y algunos géneros de la familia *Sapotaceae* (Loría, 2015).

### 3.1.4 Clima

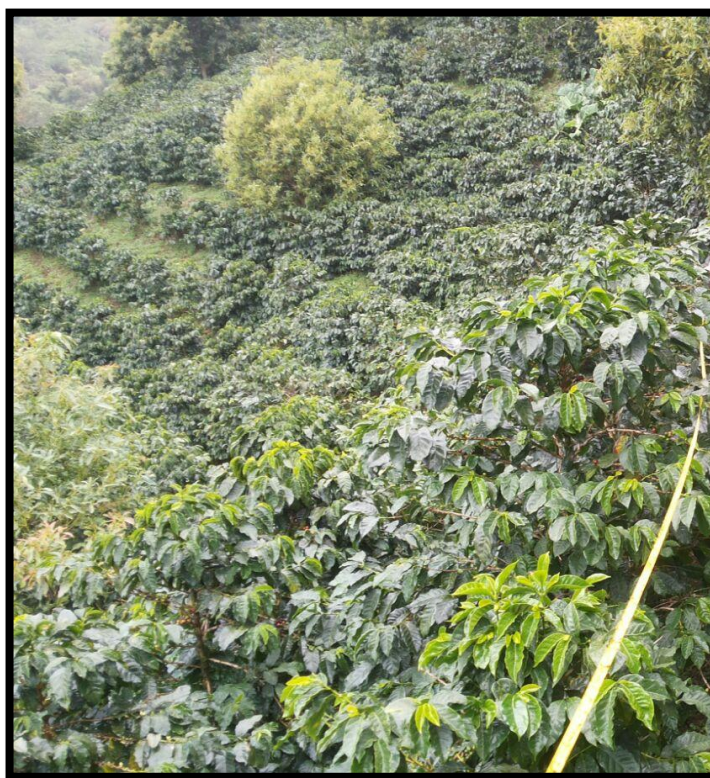
Según la clasificación del clima de Koppen, el área de estudio, se encuentra en zona C, que comprende los climas templados lluviosos, en donde la temperatura media anual más cálida es mayor de 10°C y la temperatura

media mensual más fría es menor de 18°C, pero mayor de -3°C (MIDA, 2011).

### 3.1.5 Descripción y ubicación de las parcelas

Las parcelas de muestreo, representativas de cada tratamiento, en las cuales se llevó a cabo esta investigación, presentan las siguientes características:

- **Parcela sin sombra:**

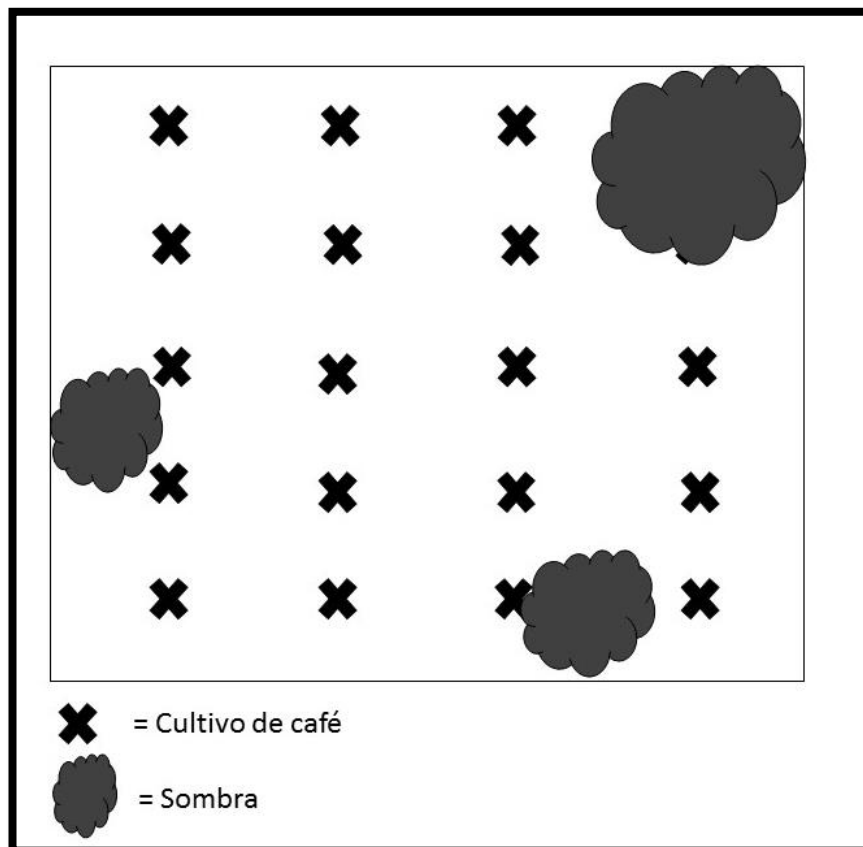


• • **Figura 2.** Parcelas de café sin sombra

Las parcelas fueron establecidas, en una sección donde el cultivo de café se encontraba desprovisto de sombra, en su gran mayoría, considerada una sombra rala con un porcentaje de sombra menor a 15%, encontrados en una sección de pendiente media dentro de la finca de Doña Amelia, las parcelas se encuentran ubicadas en las coordenadas UTM 344343 E y 971483 N, a

una altitud de 1,361 metros sobre el nivel del mar, el cafetal se encuentra en asocio con ciertos arbustos y cítricos como se puede apreciar en la figura 2, los cuales no brindan alguna sombra relevante al cultivo de café. La principal variedad de café establecido es catuay.

Esta parcela corresponde al tratamiento uno sin sombra, a continuación en la figura 3, se muestra esquemáticamente la representación de la sombra en la parcela.



**Figura 3.** Representación de la sombra: parcela sin sombra

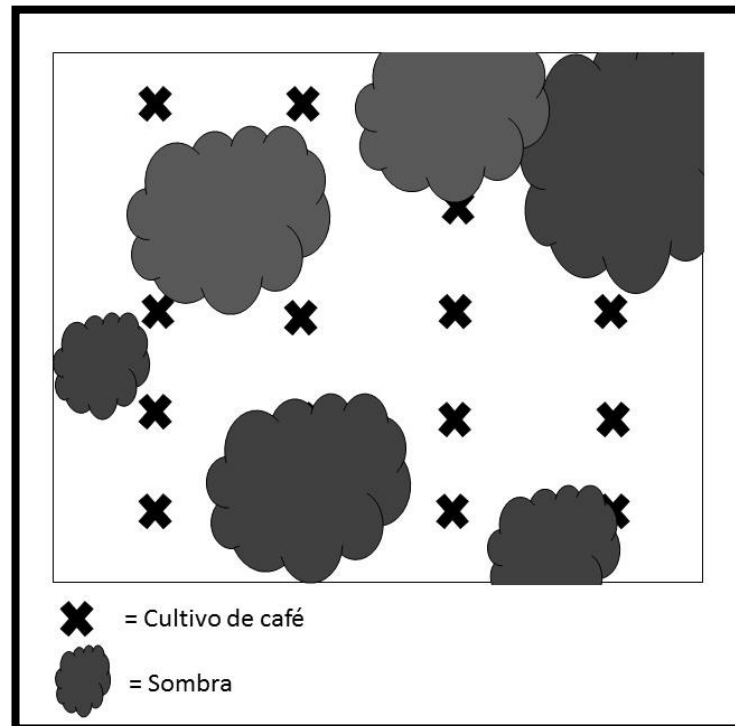
- **Parcela parcialmente sombreado:**



- **Figura 4.** Parcelas de café parcialmente sombreado

Se ubicaron en una sección de la finca Doña Amelia, encontrándose en una zona con un grado de pendiente media a alta, en las coordenadas UTM 344688 E y 971435 N, a una altitud de 1,496 metros sobre el nivel mar, la variedad de café establecido es Catuay en asocio con leñosas perennes como el guarumo (*Cecropia peltata*), y árboles frutales como los Naranjos (*Citrus sinensis*) y especies arbustivas. El nivel de sombra que se establece es considerado como sombra irregular, debido a que no existe una densidad de siembra establecida, presentándose un porcentaje de sombra de 40% a 60%, como se puede observar en la figura 4.

Esta parcela corresponde al tratamiento dos parcialmente sombreado, a continuación en la figura 5, se muestra esquemáticamente la representación de la sombra en la parcela.



**Figura 5.** Representación de la sombra: parcela parcialmente sombreada

- **Parcela totalmente sombreado:**

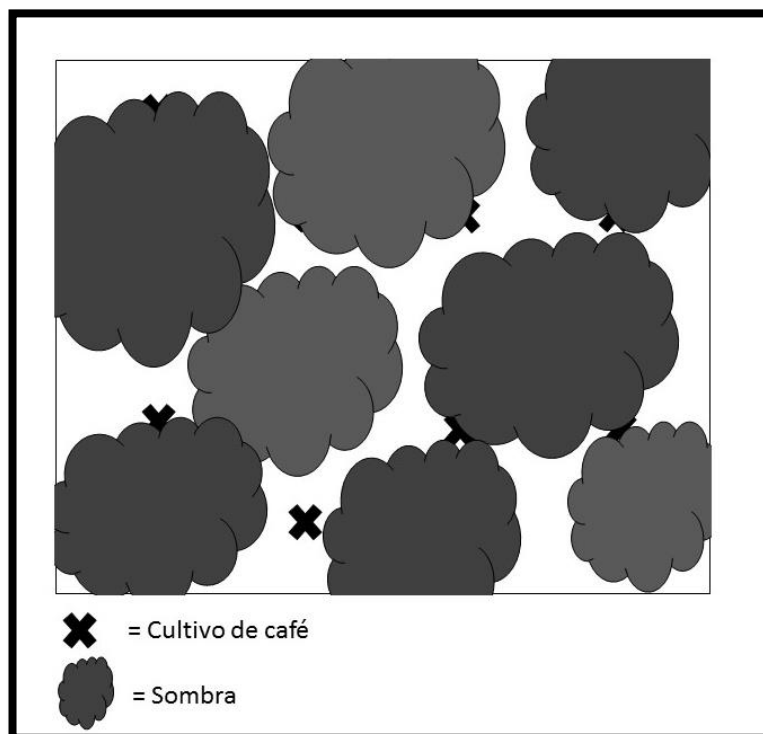
Establecida en un área con abundante sombra, en el cual predominan especies como el guabo (*Quassia amara*), zangrillo (*Paramachaerium gruberi*), aguacate (*Persea americana*), y guarumo (*Cecropia peltata*), aportando materia orgánica, y posiblemente un aumento del ciclaje de nutrimentos; la variedad de café que se encuentra establecida en estas parcelas son Pacamara y Geisha, en las coordenadas UTM 344571 E y 971701 N, a una altitud de 1,422 m.s.n.m. Es considerada totalmente sombreado, debido a que presenta un porcentaje de hasta 80% en la mayoría

de la parcela, como se muestra en la figura 6.



**Figura 6.** Parcelas de café totalmente sombreado

Esta parcela corresponde al tratamiento tres totalmente sombreado, a continuación en la figura 7, se muestra esquemáticamente la sombra.



**Figura 7.** Representación de la sombra: parcela totalmente sombreada

### 3.1.6 Fertilización de las parcelas

En las parcelas, se realizan las siguientes aplicaciones de fertilizantes:

- Parcela sin sombra:

Se realizan tres (3) ciclos de fertilización al año, a la variedad de café Catuay, se le fertiliza con 816.32 Kilogramos de sulfato de magnesio  $MgSO_4$  (aportando 164.62 Kg de Mg y 651.42 Kg de  $SO_4$ ), 816.32 Kilogramos de sulfato de amonio  $(NH_4)_2SO_4$  (aportando 222.63 Kilogramos de  $NH_4$ , y 593.69 Kilogramos de  $SO_4$ ), y 1,632.65 Kilogramos de la fórmula 18 N-46  $P_2O_5$ - 0  $K_2O$ .

- Parcela parcialmente sombreada:

En la parcela de sombra irregular se realizan tres (3) ciclos de fertilización al año, con 816.32 Kilogramos de sulfato de magnesio  $MgSO_4$ , 816.32 Kilogramos de sulfato de amonio  $(NH_4)_2SO_4$ , y 1,632.65 de la fórmula 18 N-46  $P_2O_5$ - 0  $K_2O$ . Los aportes nutrimentales son los mismos que se aplican en la parcelas sin sombra.

- Parcela totalmente sombreada:

Dentro de esta parcela predomina la variedad de café Pacamara, se le proporciona 544.22 Kilogramos de sulfato de magnesio  $MgSO_4$  (aportando 109.93 kg de mg y 434.27 kilogramos de  $SO_4$ ), 544.22 Kilogramos de sulfato de amonio  $(NH_4)_2SO_4$  (aportando 148.42 kg de  $NH_4$  y 395.79 kilogramos de  $SO_4$ ), y 1,179.13 kilogramos de ovotex 15 N- 4  $P_2O_5$ - 23  $K_2O$ .

## 3.2 Metodología

La metodología empleada en la investigación, contemplo dos fases, una fase de campo y la otra de análisis de laboratorio.

### 3.2.1 Establecimiento de las parcelas de muestreo

Se definieron parcelas de muestreo en campo, mediante el diseño de bloques completamente al azar, con un dimensionamiento de 10 metros por 10 metros, siendo un área total de 100 metros cuadrados; de cada parcela se tomaron las muestras de suelo a dos diferentes profundidades, de 0-10 y de 10-20 centímetros como se evidencia en el anexo 1, de las cuales estuvieron determinadas por tres diferentes rangos de sombras existentes en el cultivo de café, se obtuvieron seis (6) muestras por cada rango de sombra, realizando a su vez tres repeticiones, al final se obtuvo un total de 18 muestras.

A continuación se muestra el representativo del diseño en campo.

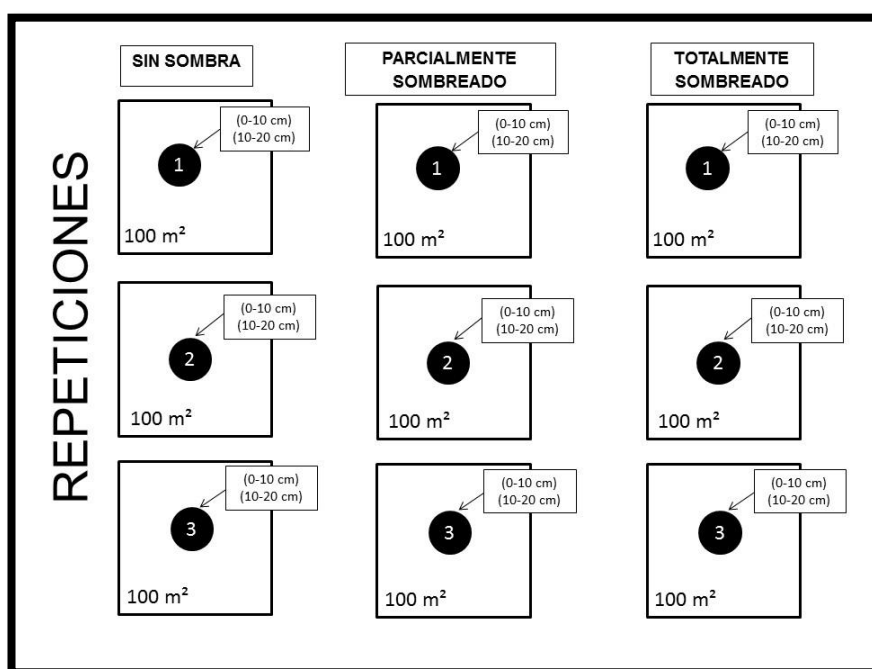


Figura 8. Representación del diseño del ensayo

### **3.2.2 Muestreo y Análisis de suelo**

El muestreo de suelo para análisis de fertilidad, se realizó tomando tres muestras compuestas de suelo producto de sub-muestras en campo en forma de zig-zag en franjas horizontales, representativas de cada tratamiento; se realizó con ayuda de un barreno holandés, machete y bolsas para la recolección de las muestras de suelo, del cual se analizaron los contenidos de los minerales presentes por método de adsorción, materia orgánica (Walkley-Black) y pH en agua.

### **3.2.3 Cuantificación del fósforo total**

Para la evaluación del fósforo orgánico, inorgánico y fósforo total, presentes en las muestras obtenidas en campo, se procedió según, la metodología del fraccionamiento secuencial adoptado por el CIAT (Centro Internacional de Agricultura Tropical), con la técnica modificada por Hedley et al. (1982), Tiesen y Moir (1993) y Oberson (1995). A continuación se detalla la secuencia y del cual se evidenció de forma fotográfica en los anexos 2 y 3 parte del procedimiento de la metodología descrita.

1. Obtener sub-muestras de 10 gramos de suelo, dejar secar al aire.
2. Tamizar (Tamiz de 2 milímetros).
3. Pesar 1.0 gramos de suelo y agitar por 16 horas en un tubo centrífuga con 30 mL de agua desionizada y con resinas de intercambio aniónico.

4. Lavar las resinas con agua desionizada y colocarla en una solución de 30 ml de HCL 0.5 N en agitación durante toda la noche.
5. Después de agitada la solución, centrifugar por 10 minutos la suspensión de suelo a 5000 rpm.
6. Del sobrenadante (parte superior de la mezcla después de la centrifugación), se determina el fósforo inorgánico de resina por el método colorimétrico de ácido ascórbico-molibdato.
7. Agregar al suelo 30 mL de  $\text{NaHCO}_3$  0.5 M, y agitar durante 16 horas.
8. Después de agitar, centrifugar, decantar el extracto de  $\text{NaHCO}_3$  y determinar el fósforo inorgánico y el fósforo total en  $\text{NaHCO}_3$ .
9. Agregar al suelo restante 30 mL de  $\text{NaOH}$  0.1 M y agitar durante toda la noche.
10. Centrifugar y decantar el extracto de  $\text{NaOH}$  0.1 M, tomar una alícuota de 10 ml y adicionarle 4 mL de  $\text{H}_2\text{SO}_4$  y agitar por 10 minutos, luego centrifugar y determinar el fósforo inorgánico y el fósforo total en  $\text{NaOH}$ .
11. Extraer el suelo remanente con 30 mL de HCl, y dejar en agitación durante 16 horas.
12. Después de agitada la solución, centrifugar por 10 minutos la suspensión de suelo a 5000 rpm. Del sobrenadante (parte superior de la mezcla después de la centrifugación), se determina el fósforo inorgánico de HCl. El sobrenadante debe ser eliminado filtrándolo y el suelo debe ser filtrado y secado, para luego pesar 0.20 gramos de suelo que será transferido a tubos de vidrio, para la determinación del fosforo residual.

13. El fósforo residual se determina por medio de digestión, añadiendo 8 mL de una mezcla de ácido nítrico + ácido perclórico + ácido sulfúrico (en la proporción 4:2:2), digerir las muestras por tres horas, los 30 primeros minutos a una temperatura de 150°C, luego elevar la temperatura a 220°C y mantenerla por una hora, posteriormente se debe elevar la temperatura a 270°C y digerir de una a una hora y media. Nota: Las muestras se consideran totalmente digeridas cuando el suelo se torna completamente blanco transparente.
14. Trasvasar todo el suelo más solución de los tubos a balones de 100 mL lavar bien los tubos con agua destilada, y completar el volumen del balón; taparlos y agitarlos.
15. Filtrar el suelo, y del sobrenadante Analizar el fósforo colorimétrico por el método de Murphy y Riley (1962).
16. Finalización de la determinación secuencial de las fracciones de fósforo.

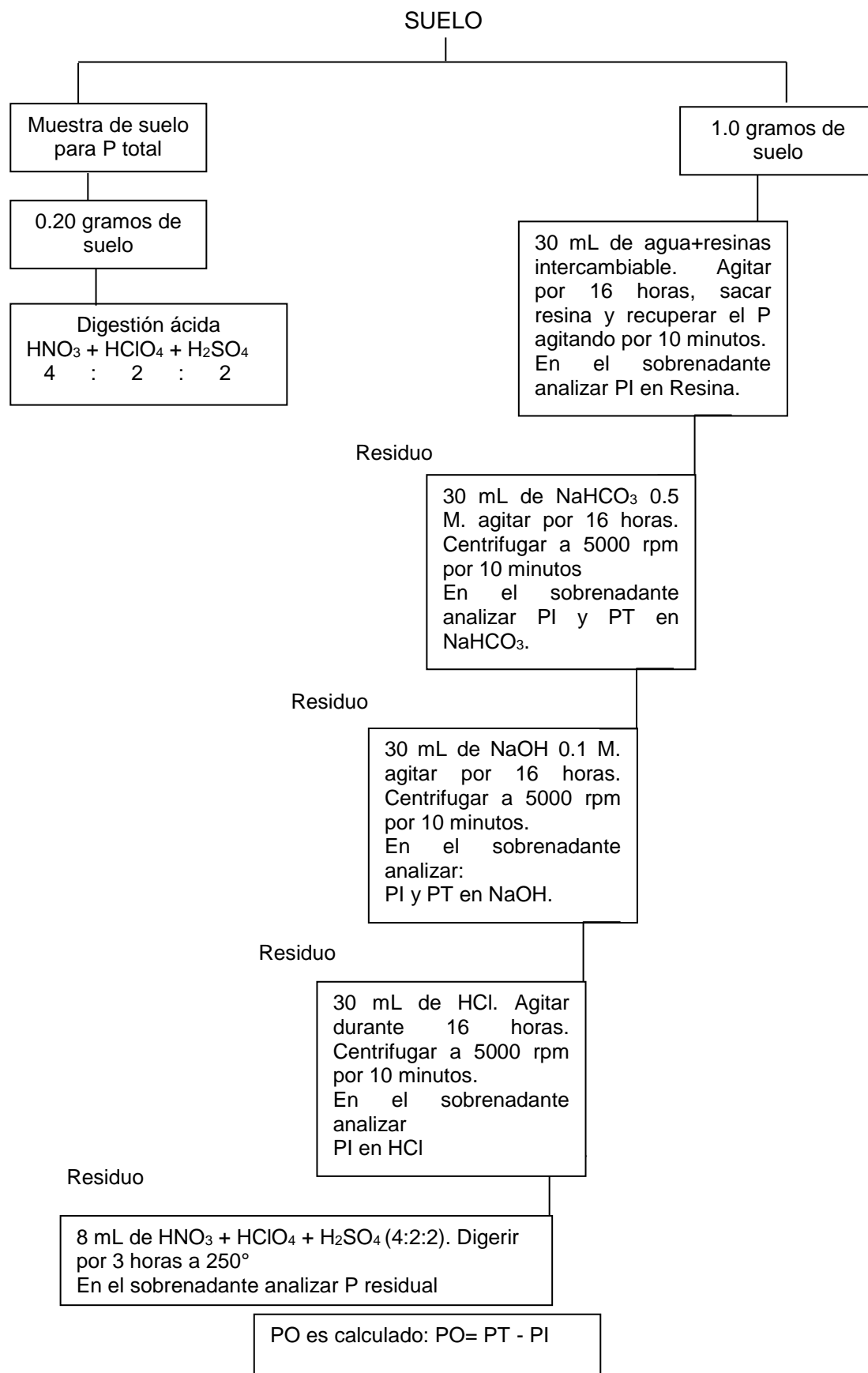
#### Determinación del fósforo total:

1. El fósforo total de las muestras de suelo, se determina pesando 0.20 gramos de suelo seco al aire en tubos de vidrio, agregando 8 ml de una mezcla de ácido nítrico + ácido perclórico + ácido sulfúrico (proporción 4:2:2), luego digerir las muestras por tres horas, los 30 primeros minutos a una temperatura de 150°C, elevar la temperatura a 220°C y digerir de una hora a una hora y media (en este caso 45 minutos).
2. Cuando el suelo toma una coloración blanca, retirar los tubos del digestor y enfriar; trasvasar todo el contenido de los tubos para

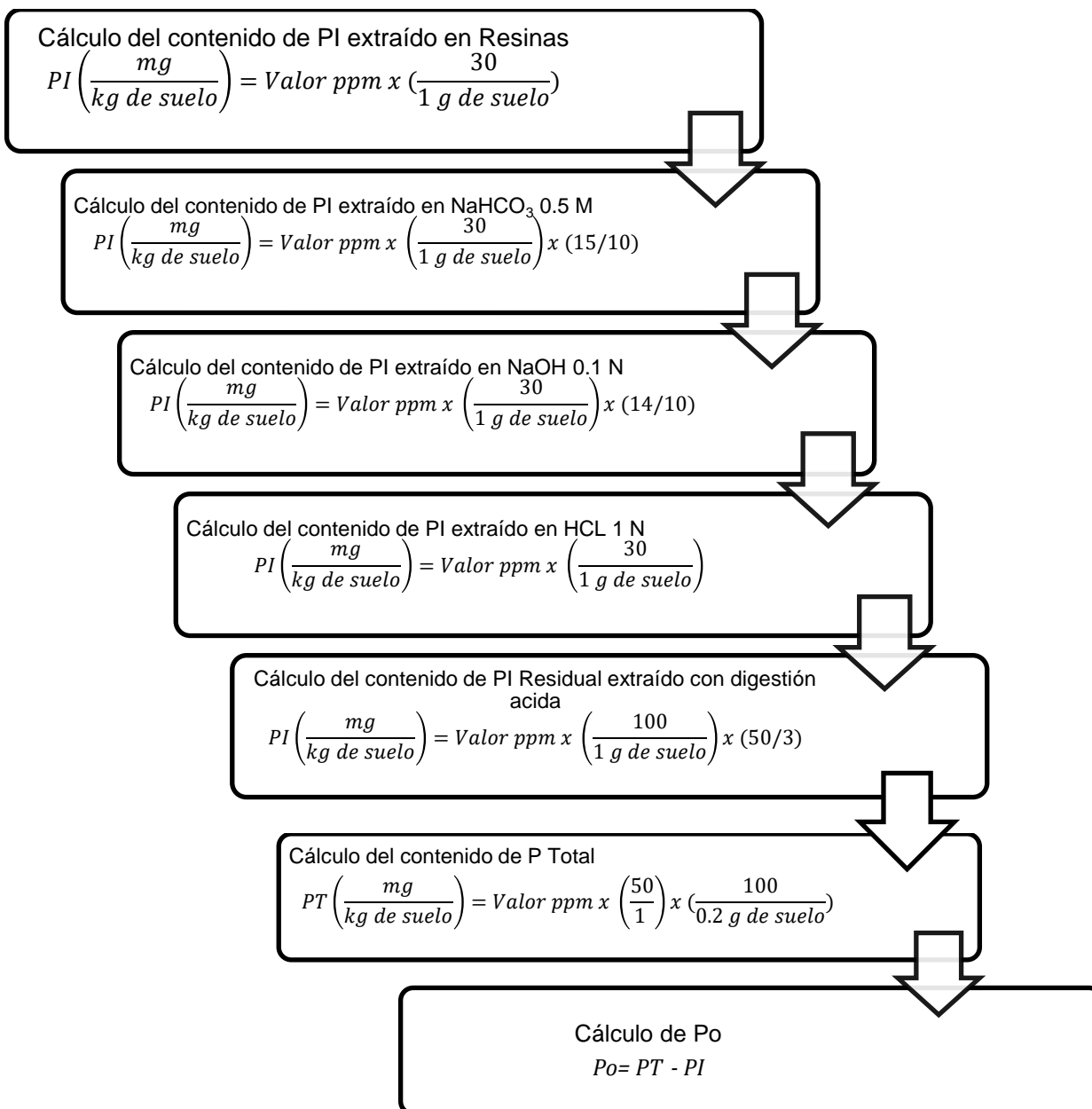
balones de 100 mL. Lavar bien los tubos con agua destilada. Aforar los balones, taparlos y agitarlos.

3. Filtrar el suelo y del sobrenadante determinar el fósforo por colorimetría por el método de Murphy y Riley (1962).
4. El fósforo en todos los extractantes se determina por el método colorimétrico de ácido ascórbico-molibdato.
5. El fósforo orgánico en los extractantes  $\text{NaHCO}_3$  y  $\text{NaOH}$  se calcula por la diferencia entre el fósforo total y el fósforo inorgánico.

**Figura 9.** Diagrama del fraccionamiento secuencial de P del suelo, modificado por Hedley et al. (1982).



## 6. Cálculos para las determinaciones de las fracciones de fósforo:



PI= Fósforo Inorgánico

PO= Fósforo orgánico

PT= Fósforo total

### 3.3 Parámetros a evaluar

#### 3.3.1 Fracciones de fósforo

Se determinó mediante la metodología descrita por Mejía (2010), del fraccionamiento secuencial, adoptado por el CIAT (Centro Internacional de

Agricultura Tropical), con la técnica descrita por Hedley et al. (1982), Tiesen y Moir (1993) y Oberson (1995); utilizando resinas de intercambio iónico, y soluciones de  $\text{NaHCO}_3$ ,  $\text{NaOH}$ ,  $\text{HCl}$  y  $\text{HClO}_4$ , mediante la cual se determinó la cantidad de fósforo total, fósforo orgánico y fósforo inorgánico, presente en los suelos andisoles de origen volcánico, dentro del área de estudio, del distrito de Boquete.

### **3.3.2 Análisis de fertilidad del suelo**

El análisis de fertilidad del suelo (pH, Materia orgánica, acidez, P, K, Ca, Mg, Cu, Mn y Zn), se realizó con la metodología descrita por Díaz Romeu y Hunter (1978). El pH se determinó en agua (1:2.5), la materia orgánica se determinó por el método de Walkley y Black (Saís del Río y Bornemiza 1962), la acidez intercambiable (H+AL) se extrajo con  $\text{KCl}$  1N y los minerales K, Ca, Mg, Fe, Cu, Mn, extraídos con la solución de Carolina del Norte y determinados por absorción atómica.

### **3.3.3 Materia orgánica**

Se determinó mediante el método de Walkley-Black, el cual se basa en la oxidación de la materia orgánica en presencia de ácido sulfúrico como fuente de calor, además del ácido fosfórico y dicromato de potasio (Fassbender, 1980).

Se utilizó la fórmula de Jackson (1982), para el porcentaje de materia orgánica, presente en las muestras de suelo.

$$\%MO = 10 \left( 1 - \frac{T}{S} \right) * F$$

Dónde:

S= Valoración en blanco, ml de solución ferrosa.

T= Valoración de la muestra, ml de solución ferrosa.

F=Factor (1.34 para 0.5 gramos de suelo, 3.55 para 0.2 gramos).

### 3.3.5 Modelo estadístico

El diseño utilizado fue el de bloques completamente al azar, con tres repeticiones, el muestreo se realizó a dos diferentes profundidades (0-10 y de 10-20 centímetros), y tres niveles de sombra. La unidad experimental está representada por 3 parcelas de 10 metros por 10 metros, con un área total de 100 metros cuadrados, al final se obtuvieron 18 muestras de suelo.

Se utilizó el modelo experimental:

$$X_{ij} = \mu + \beta_j + T_i + e_{ij}$$

Dónde:

$X_{ij}$ = Variable aleatoria observable.

$\mu$ = Media General.

$\beta_j$ = Efecto de j-ésima tratamiento.

$T_i$ = Efecto del i-ésima tratamiento.

$e_{ij}$ = Variable aleatorio, independiente de t y  $\beta$ .

## **4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

### **4.1 Análisis de suelo y contenido de nutrimentos.**

En el cuadro I, se muestran los resultados del análisis químico y físico del suelo estudiado y se muestran las clases texturales.

El tratamiento uno, correspondiente al sistema de café sin sombra, presenta un pH de 5.0 categorizado como muy ácido, de los macroelementos el potasio (K) presenta un alto contenido de igual forma las cantidades de magnesio (Mg), el fósforo disponible en el suelo, con 27.49 partes por millón considerado un contenido medio puede correlacionarle por la fertilización con Fosfato diamónico de la forma 18 (N)-46(P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>)-0(K<sub>2</sub>O), el elemento sodio (Na) obtuvo un bajo contenido, en el suelo se presenta un bajo contenido de calcio (Ca) lo cual expresa que existen deficiencias de calcio en el suelo. Los microelementos en las parcelas del tratamiento uno presentaron un bajo contenido de hierro (Fe), al igual que el manganeso (Mn), y el zinc (Zn), observándose un contenido medio de cobre (Cu).

La acidez de este suelo es baja y no se presenta aluminio intercambiable, por otra parte el valor de la materia orgánica es alto, correlacionado con el abonamiento con lombricompost que se le brinda al suelo, en este tratamiento el valor de materia orgánica es un valor inferior, en relación a los otros tratamientos. Por último el suelo de las parcelas del tratamiento uno, se ubica dentro de la clase textural areno franco.

**CUADRO I. ANÁLISIS QUÍMICO Y FÍSICO DEL SUELO ESTUDIADO.**

Tratamiento	pH (H <sub>2</sub> O)	P	K	Na	Fe	Cu	Mn	Zn	Ca	Mg	Acidez	Al	M.O
	1:2.5	ppm=(mg/kg)							meq/100g				%
T-1	5.0	27.49	157.6	10.55	1	2.8	3.7	2.3	0.35	4.76	0.25	0.00	9.24
T-2	4.7	31.19	279.4	9.70	0.8	1.1	23.4	1.8	0.89	1.23	0.25	0.00	10.97
T-3	5.3	18.23	303.4	11.12	1.2	8.2	63.5	1.5	30.95	1.77	0.55	0.00	10.40

T-1: Sin Sombra T-2: Parcialmente sombreado T-3: Totalmente sombreado

Tratamiento	Arcilla	Arena	Limo	Clase Textural
	%			
Sin Sombra	5.5	79.8	14.7	Areno Francoso
Parcialmente sombreado	1.2	84.8	14.0	Areno Francoso
Totalmente soombreado	4.7	80.8	14.5	Areno Francoso

El suelo del tratamiento dos, de un sistema de café parcialmente sombreado, presenta un pH muy ácido de 4.7, el fósforo disponible presenta un contenido alto con 31.19 partes por millón, correlacionándolo con la fertilización que le brindan a este suelo incorporando fosfato diamónico de la forma 18(N)-46(P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>)-0(K<sub>2</sub>O) al igual que el tratamiento uno, por otra parte el contenido de potasio (K) fue alto, el magnesio (Mg) presenta un contenido medio, y los elementos sodio (Na) y calcio (Ca) poseen bajos contenidos en el suelo, siendo deficientes para el cultivo de café. Por otra parte se observaron bajos contenidos de los elementos, Cu, Mn y Zn, y un contenido medio de Fe.

La acidez presente es baja y no se encuentra aluminio intercambiable, el contenido de materia orgánica es alto, presentándose por las cantidades de hojarasca de las especies arbustivas que brindan sombra al cultivo de café. La clase textural es Areno francoso, con alto porcentaje de arena y limo.

El suelo, analizado correspondiente al tratamiento tres, de un sistema de café totalmente sombreado, presenta un pH ácido de 5.3, con baja acidez y no presenta aluminio intercambiable, este suelo contiene alto contenido de materia orgánica, proveniente de la asociación de árboles y arbustos que brindan sombra al cultivo de café.

Se presenta una mediana cantidad de fósforo disponible en el suelo, que es fertilizado con Ovotex de la forma 15(N)-4(P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>)-23(K<sub>2</sub>O), por lo cual se observa poca cantidad disponible, que es mayormente aportado por medio de la fertilización, se observa un alto contenido de K, Ca, Mg, Mn al igual que el Cu lo cual indica que el suelo contiene un buen nivel de fertilidad, en los elementos de Na, Fe, y Zn se observa niveles medios de estos contenidos en

el suelo. La clase textural es areno franco, con un mayor contenido de arena y limo, como se muestra en el cuadro de clase textural.

## 4.2 Fracciones de Fósforo por tratamiento.

En el cuadro II, se presentan las diferentes fracciones de fósforo obtenidos en los tres tratamientos, se pueden agrupar el contenido de fósforo en formas disponibles las cuales representan el fósforo extraído por medio de las resinas de Intercambio aniónico y  $\text{NaHCO}_3$ , el fósforo moderadamente disponible fue determinado mediante los extractates de  $\text{NaOH}$  y  $\text{HCl}$ , y fósforo residual que se extrajo mediante una mezcla ácida de nítrico + perclórico + sulfúrico (proporción 4:2:2), al igual que el fósforo total.

Según lo indicado por Mejía, (2010), el fósforo inorgánico extraído en resina (PI-Resina) representa el fósforo más biodisponible, el fósforo de  $\text{NaHCO}_3$  el adsorbido a los coloides, el fósforo determinado por  $\text{NaOH}$  representa el quimiadsorbido a los compuestos de Fe y Al, el fósforo inorgánico extraído en  $\text{HCl}$  relativamente insoluble unido al Ca y P ocluido en suelos meteorizados y el fósforo residual representa el fósforo químicamente muy estable e insoluble.

**CUADRO II.** CONTENIDO DE LAS FRACCIONES DE FÓSFORO POR TRATAMIENTO EN FINCA DOÑA AMELIA- JARAMILLO ARRIBA 2016.

Fracciones de Fósforo	Tratamientos		
	Sin Sombra	Parcialmente sombreado	Totalmente sombreado
P Inorgánico Resina	28.465 a	9.871 b	9.227 b
P Inorgánico $\text{NaHCO}_3$	54.468 a	51.457 a	28.018 b
P Inorgánico $\text{NaOH}$	976.22 a	689.47 b	279.57 c
P Inorgánico $\text{HCl}$	12.924 b	31.512 a	17.697 b
P Orgánico	391.1 a	550.9 a	712.2 a
P Residual	780.16 a	656.17 b	611.48 b
P Total	2,243.2 a	1,989.4 ab	1,658.2 b

Valores seguidos por la misma letra no difieren significativamente Duncan 5%.

En el cuadro II, se observa que existen diferencias significativas en los efectos de los tratamientos sobre las fracciones de fósforo, relacionando un aumento en las cantidades de fósforo en el tratamiento uno el cual corresponde al tratamiento sin sombra, el cual podría deberse al efecto de la fertilización química que es aplicada a estas parcelas, por consiguiente el tratamiento que obtuvo una menor cantidad de las fracciones de fósforo fue el tratamiento tres correspondiente al tratamiento totalmente sombreado el cual es fertilizado con una menor cantidad, en el fósforo total se observó el mismo patrón y en cual el tratamiento dos presentó un valor intermedio de la cantidad de fósforo, exceptuando los resultados de la fracción de fósforo orgánico el cual resulto un contenido mayor en el tratamiento tres, siendo menor en el tratamiento uno, teniendo en cuenta que el incremento de la materia orgánica y hojarasca producido por el componente arbóreo juega un papel fundamental en la fracción orgánica.

**CUADRO III.** ANÁLISIS DE VARIANZA PARA LOS DATOS DE LAS FRACCIONES DE FÓSFORO EN FINCA DOÑA AMELIA-JARAMILLO ARRIBA 2016.

FRACCIONES DE FÓSFORO	Pr>F							
	FUENTE							
	Bloque		Profundidad		Tratamiento		Prof. x Trat.	
P Inorgánico Resina	0.615	NS	0.0724	NS	0.0026	**	0.0714	NS
P Inorgánico NaHCO <sub>3</sub>	0.6468	NS	0.8699	NS	0.0023	**	0.7604	NS
P Inorgánico NaOH	0.7642	NS	0.2474	NS	<0.0001	**	0.4184	NS
P Inorgánico HCl	0.8164	NS	0.951	NS	<0.0001	**	0.5336	NS
P Orgánico	0.6872	NS	0.8079	NS	0.1875	NS	0.1675	NS
P Residual	0.0971	NS	0.006	**	0.0101	**	0.0011	**
P Total	0.3616	NS	0.733	NS	0.0155	**	0.5046	NS

NS= Indica un efecto no significativo.

\*\*= Indica un efecto significativo al nivel de probabilidad de 1%.

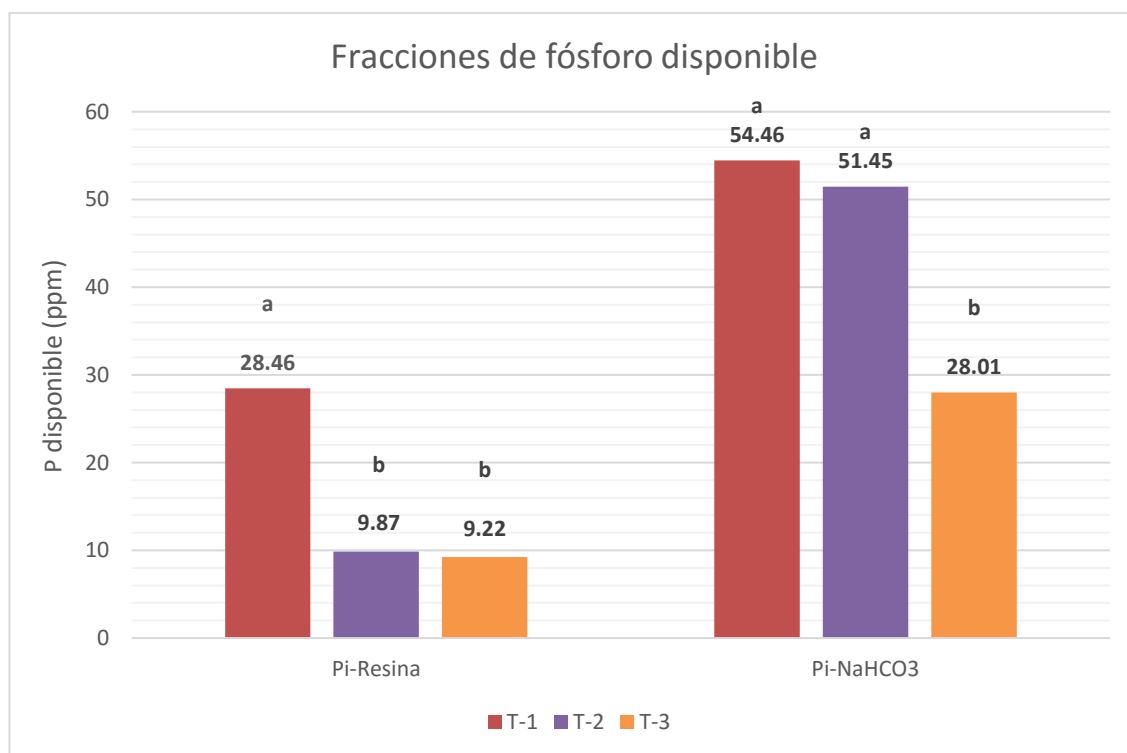
En el cuadro III, se presenta el análisis de varianza para los datos de las fracciones de fósforo, el cual reveló que no existen diferencias significantes entre bloques ( $P>0.05$ ), en todas las variables de las fracciones de fósforo, igualmente no hubo diferencias significativas en la interacción de profundidad x tratamiento sobre las fracciones de fósforo, exceptuando los valores para fósforo residual.

La profundidad no tuvo un efecto significativo ( $P>0.05$ ), exceptuando las fracciones de fósforo residual en el cual si se mostró diferencias significativas en la profundidad del suelo. Se observó un efecto altamente significativo de los tratamientos ( $P>0.01$ ), en las variables de fósforo inorgánico extraído en resina (PI-Resina), fósforo inorgánico extraído en Bicarbonato de Sodio (PI- $\text{NaHCO}_3$ ), fósforo inorgánico extraído en Hidróxido de Sodio (PI- $\text{NaOH}$ ), fósforo inorgánico extraído en Ácido Clorhídrico (PI- $\text{HCl}$ ), fósforo residual y fósforo total, exceptuando las fracciones de fósforo orgánico (PO), las cuales no mostraron un efecto significativo entre los tratamientos ( $P>0.05$ ).

### 4.2.1. Fósforo Disponible

El fósforo disponible en el suelo, comprenden el fósforo inorgánico extraído por medio de las resinas de intercambio aniónico, y el fósforo inorgánico de  $\text{NaHCO}_3$ .

Según Negrín (2005), la extracción por resina es una estimación confiable del fósforo disponible para las plantas, debido a que las resinas aniónicas simulan la forma de actuar de las raíces de las plantas.



\*Medias seguidas por la misma letra no difieren significativamente de acuerdo con la prueba de rangos múltiples de Duncan.

**Figura 10.** Fracciones de fósforo disponible. Finca Doña Amelia- Jaramillo Arriba 2016.

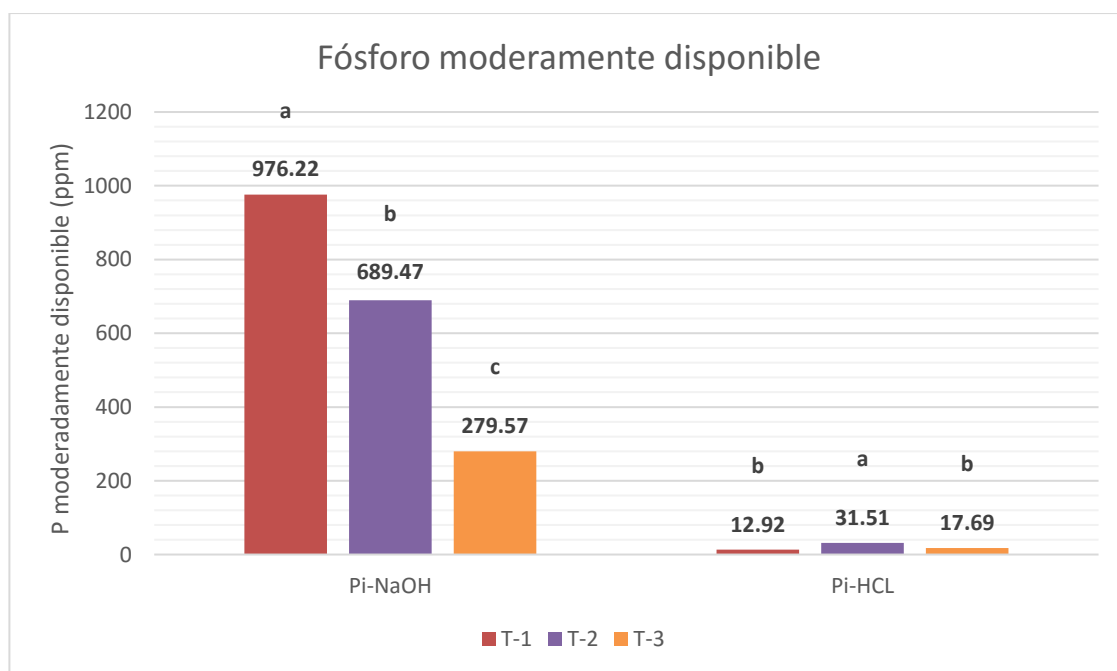
En la figura 10, se puede muestra gráficamente que existen diferencias significativas en las fracciones inorgánicas de fósforo disponible, en el caso del PI-Resina el tratamiento uno difiere significativamente de los tratamientos dos y tres, teniendo un contenido mayor de fósforo inorgánico de 28.46 partes por millón, al igual que en el Pi  $\text{NaHCO}_3$ , el cual presenta un mayor contenido de fósforo inorgánico es el tratamiento uno con un valor medio de 54.46 partes por millón, el cual no difiere significativamente del tratamiento dos con 51.45 partes por millón, no obstante el tratamiento tres es el que posee menor contenido de PI obteniendo 28.01 partes por millón difiriendo significativamente de los tratamientos uno y dos.

El tratamiento uno, que representa el tratamiento sin sombra, es el que mayor contenido de fósforo inorgánico disponible posee para las plantas, tratándose del fósforo más biodisponible, debido a que las parcelas de los tratamientos uno y dos poseen alta fertilización con fosfatos. A diferencia del PI-Resina el PI- $\text{NaHCO}_3$  extrajo mayores valores de fósforo disponible en el suelo para el cultivo de café, correlacionándolo con el estudio realizado por González (1997), que obtuvo mayores fracciones de PI- $\text{NaHCO}_3$ , en relación al PI-Resina.

El tratamiento tres, que corresponde al tratamiento totalmente sombreado, presentó en general menor contenido de fósforo inorgánico disponible, extraído con resina presentándose una media de 9.22 partes por millón, estos resultados coinciden con los bajos valores de PI-Resina en un sistema orgánico, estudiado por Mejía (2010), esto se debe a la velocidad de la disponibilidad del fósforo para el cultivo, en el este caso refiriéndonos a los residuos orgánicos y hojarasca que son proporcionadas por el componente

arbóreo, estos tienen que ser descompuestos por los microorganismos, conociéndose que los residuos orgánicos tienen bajas concentraciones de fósforo a comparación de los fertilizantes, en tal caso la variedad de café Pacamara que predomina en los suelos del tratamiento tres, es fertilizado con bajas dosis de fósforo, y otros minerales por lo cual no se evidencia un alto contenido de fósforo disponible en este tratamiento, a comparación de los tratamientos uno y dos.

#### 4.2.2 Fósforo moderadamente disponibles



\*Medias seguidas por la misma letra no difieren significativamente de acuerdo con la prueba de rangos múltiples de Duncan.

**Figura 11.** Fracciones de fósforo moderadamente disponible. Finca Doña Amelia- Jaramillo Arriba 2016.

Las fracciones de fósforo moderadamente disponibles, comprenden el fósforo extraído por NaOH y HCl.

Según Picone, citado por Mejía (2010), el NaOH extrae el fósforo inorgánico quimioadsorbido a los oxihidróxidos de Fe y Al amorfos y algunos cristalinos, y fósforo orgánico asociado a compuestos húmicos y adsorbidos al Fe y Al.

Cabe resaltar que el pH juega un papel crucial en la adsorción de fósforo, como describe Sanzano (2010), a pH ácidos aumentan las cargas positivas de los coloides y a consecuencia de esto, aumenta la adsorción de fósforo, los suelos estudiados presentan un pH de un rango ácido a muy ácido.

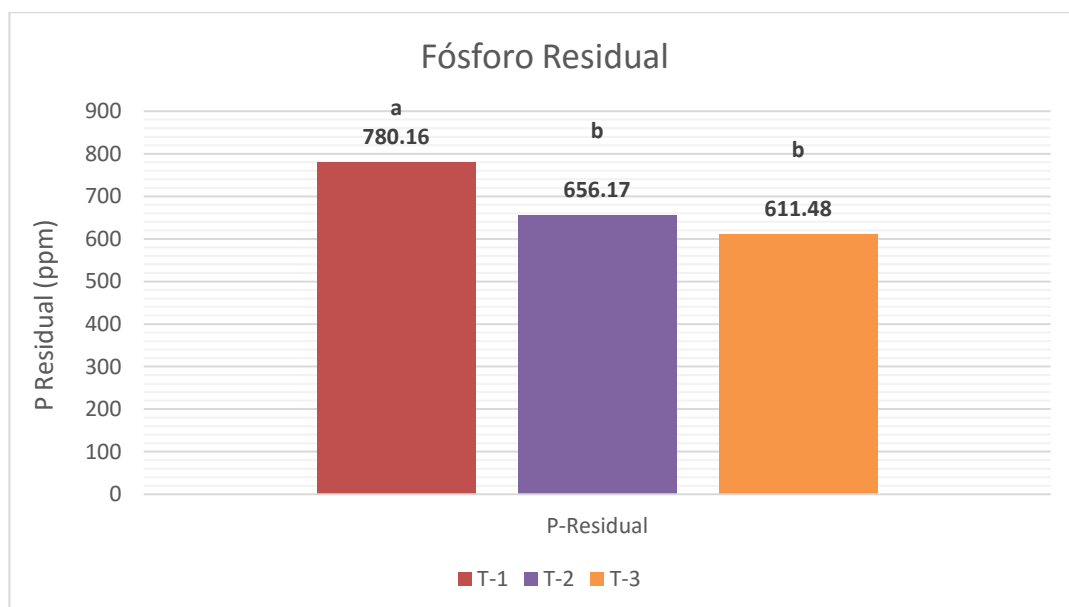
En la figura 11, se pueden observar los valores de las fracciones del fósforo moderadamente disponible, por lo cual el tratamiento uno, contiene mayor cantidad de PI-NaOH presentándose 976.22 partes por millón, difiriendo significativamente de los tratamientos dos y tres, por lo general los tres tratamientos poseen mayor contenido, en comparación a los contenidos de PI-HCl. En el caso del PI-HCl, se evidencia que el tratamiento dos fue el que obtuvo un mayor contenido. Se pudo observar el mismo patrón de resultado de PI-NaOH y PI-HCl, en el estudio realizado por González (1997), y en los valores, obtenidos por Boschetti et al (2003), en el cual se presentó una menor cantidad de fósforo en las formas lábiles, atribuido a la presencia de Al y Fe amorfos que ofrecen una superficie de retención de fósforo, que lo mantiene en las formas moderadamente lábiles o disponibles, por esto a medida que avanza la intemperización en los suelos, se produce un incremento en la actividad del Fe y el Al, y cambios de las formas primarias del fósforo a secundarias; estas transformaciones, se manifiestan en el aumento del fósforo soluble en NaOH y en una disminución de la cantidad de fósforo extraído con HCl diluido.

El PI-HCl es el fósforo inorgánico relativamente Insoluble unido al Ca, según describe Mejía (2010). Por último se pueden correlacionar los altos valores de PI-NaOH, en los tratamientos uno y dos por la incorporación de fertilizantes fosfatados (DAP), el contribuyó al aumento de los contenidos de fósforo en las diferentes fracciones.

#### 4.2.3 Fósforo no disponible (Residual)

El fósforo residual, se refiere al fósforo que no se encuentra disponible para las plantas, pero este puede llegar a ser disponible en un periodo de tiempo.

Las fracciones de fósforo residual corresponden a las fracciones inorgánicas y orgánicas muy estables y que se encuentran fuertemente encapsuladas por minerales del suelo por lo que son insolubles, Mejía (2010).



\*Medias seguidas por la misma letra no difieren significativamente de acuerdo con la prueba de rangos múltiples de Duncan.

**Figura 12.** Fracciones de fósforo residual. Finca Doña Amelia- Jaramillo Arriba 2016.

El análisis de medias por Duncan presentado en la figura 12, indico que el tratamiento número uno, obtuvo la media más alta con 780.16 partes por millón representando el fósforo no disponible en el suelo y que este tratamiento difiere significativamente de los tratamientos dos y tres presentando 656.17 y 611.48 partes por millón respectivamente, con valores medios inferiores al primer tratamiento, en cambio el tratamiento dos y tres no difieren significativamente entre sí.

Se conoce que el fósforo residual es una fracción importante del fósforo total en el suelo, este correspondió en promedio a 34.76 por ciento del fósforo total en el suelo estudiado de Jaramillo Arriba en Boquete, valor similar al realizado por Mejía (2010), el cual el fósforo residual correspondió al 37 por ciento del fósforo total en suelos del Valle del Cauca en Colombia, perteneciente al mismo orden de suelo, por otro lado en un molisol presenta un promedio de 32 por ciento de fósforo residual.

El incremento del contenido de fósforo residual, se da a largo plazo mediante las aplicaciones de fertilizantes químicos y la incorporación de materiales orgánicos, Lehmann et al citado por Mejía (2010), correlacionándolo con el suelo estudiado de sistema de café arbolado, al cual le realizan tres ciclos de fertilización; al igual que, incorporan material orgánico como es el caso del lombricompost.

Otro hecho que podemos correlacionar es el descrito por Burbano citado por Mejía (2010), donde indica que en suelos tropicales las fracciones muy lábiles (inmediatamente disponibles) se encuentran en equilibrio con las fracciones lábiles (disponibles), con las moderadamente disponibles y con las de baja o

ninguna labilidad, comparando los valores del P residual con los valores de Pi disponible y moderadamente disponible, los cuales presentaron básicamente iguales patrones en las cantidad de las fracciones de fósforo.

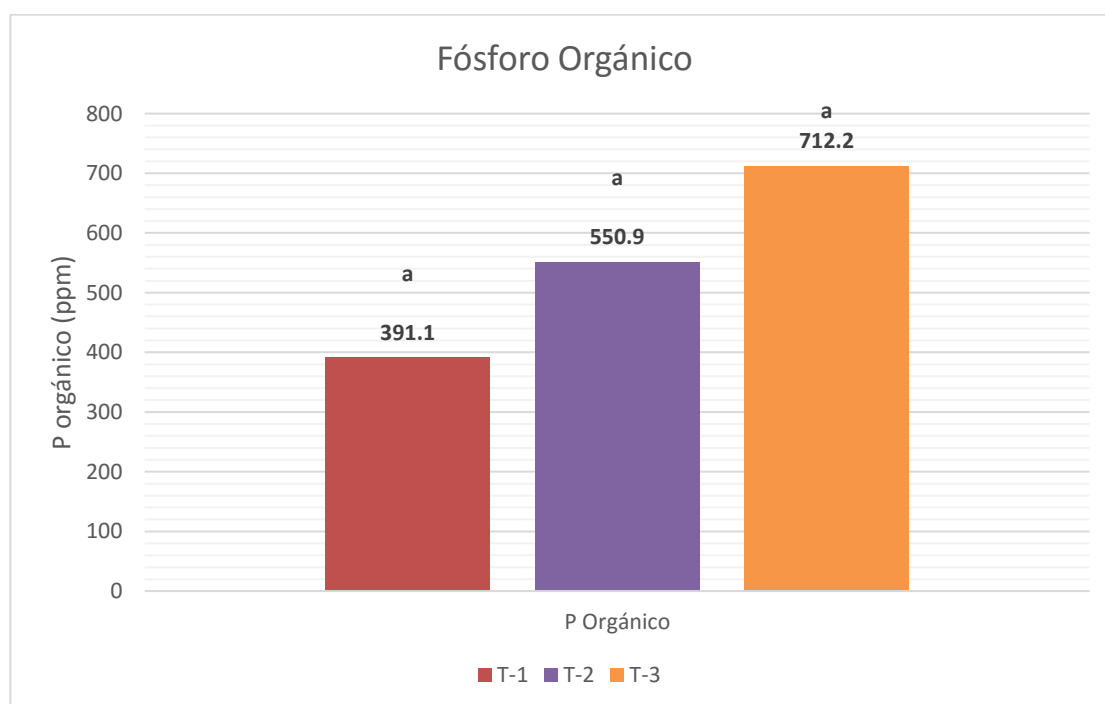
#### **4.2.4 Fósforo orgánico**

El fósforo orgánico, fue producto de la diferencia del valor del fósforo total menos el valor total del fósforo inorgánico. En este estudio el fósforo orgánico representa los valores disponibles y moderadamente disponibles encontrados en el suelo estudiado.

Se puede observar en la figura 13, se muestra que no existen diferencias significativas en el efecto de los tratamientos sobre las cantidades de fósforo orgánico, resultando un mayor contenido de fósforo orgánico en el tratamiento tres con una media de 712.2 partes por millón, que corresponde al tratamiento totalmente sombreado, el cual se puede correlacionar con los resultados del estudio de Mejía (2010), el cual el sistema orgánico de café arbolado obtuvo el mayor contenido de fósforo orgánico, debido a que en el tratamiento tres se incorpora menor cantidad de fertilizante y presenta mayor contenido de materia orgánica aportada por la asociación de árboles y arbustos, todo lo contrario a los tratamientos uno y dos que se adicionan mayor cantidad de fertilizantes químicos que entran directamente en la solución del suelo como fosfatos inorgánicos para ser absorbidos por las plantas, y en el cual los microorganismos lo transforman en fósforo orgánico

en un proceso de inmovilización, de modo que el fósforo se incorpora al reservorio de fosfatos orgánicos cuando el microorganismo perece.

Por otra parte, Boschetti (2003), describe que los cambios como la evolución de los suelos, el lavado de las bases, la remoción de carbonatos y el incremento de la actividad de Fe y Al, influyen en la estabilización de la materia orgánica y el fósforo orgánico asociado a ella. Se conoce que a medida que avanza el proceso evolutivo del suelo, se va produciendo una acumulación de fósforo orgánico en el horizonte superficial, que va acompañado del incremento del fósforo total que es producto del ciclado biológico del fósforo contenido en los residuos de plantas.



\*Medias seguidas por la misma letra no difieren significativamente de acuerdo con la prueba de rangos múltiples de Duncan.

**Figura 13.** Fracciones de fósforo orgánico. Finca Doña Amelia- Jaramillo Arriba 2016.

## **4.2.5 Fósforo total y porcentajes de fósforo orgánico e inorgánico.**

### **4.2.5.1 Fósforo Total**

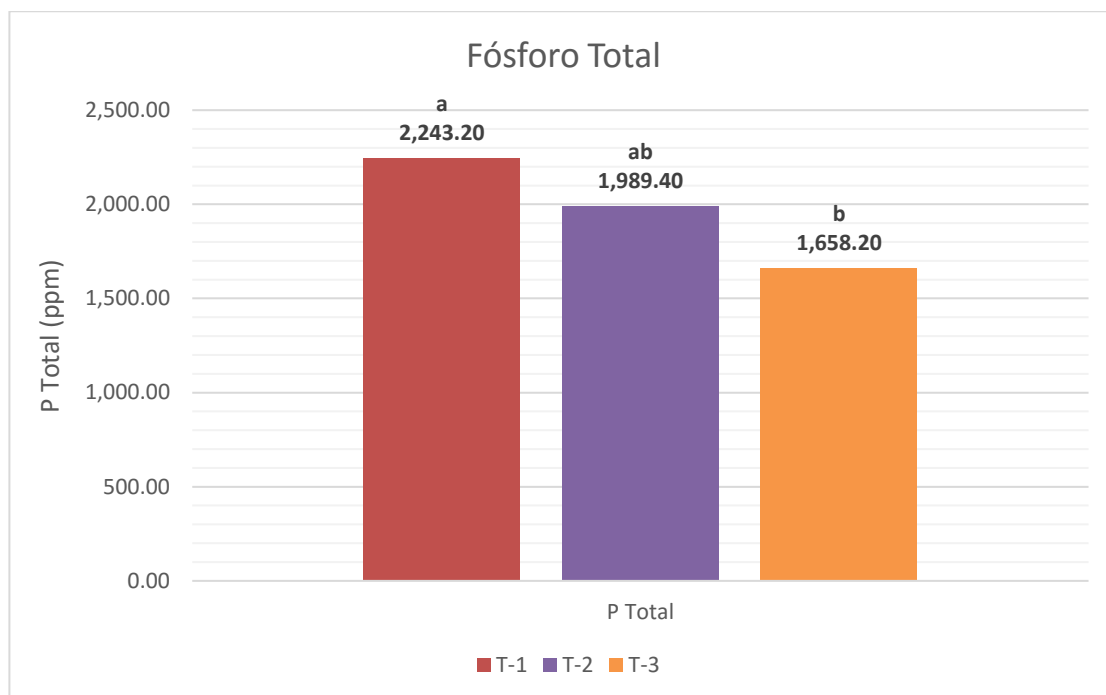
En la figura 14, se presenta el análisis de medias por Duncan, indica que la media más alta o la cantidad de fósforo total se presentan en el tratamiento uno con 2,243.20 partes por millón, el cual difiere significativamente del tratamiento tres el cual presento una media de 1,658.20 partes por millón, mas no del tratamiento dos con 1,989.40 parte por millón, el cual difiere también con el tratamiento tres, el cual presenta la media más baja de contenido de fósforo total.

Los valores obtenidos de fósforo total en el andisol del distrito de Boquete, tuvieron un promedio de 1,963 partes por millón, los altos valores se correlacionan con los datos obtenidos de fósforo total en el estudio de Macedo (1996), en un inceptisol de origen volcánico, en Costa Rica, los cuales oscilaban en un rango de 1,723 a 2,097 partes por millón de fósforo total.

El tratamiento uno y dos, obtuvieron altos valores de fósforo total, debido a su alta fertilización e incorporación de fosfatos al suelo, en comparación al tratamiento tres, al que se le adiciona una menor cantidad de fosfatos al suelo.

Estudios realizados, por López, citado por Mejía (2010), describen que los valores más altos de fósforo total corresponden al orden andisol de América

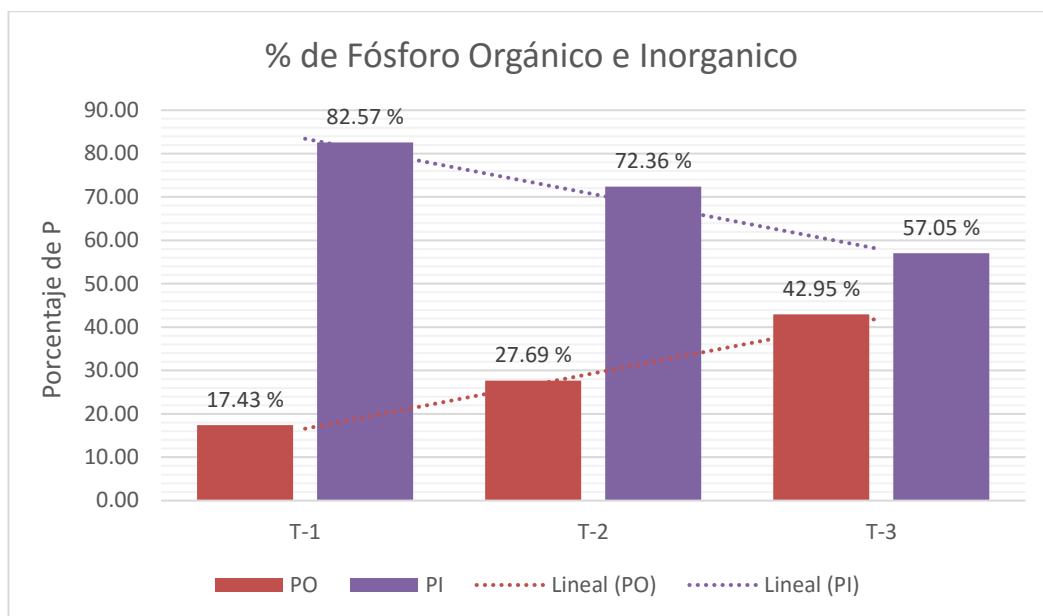
Central y Colombia, dándose valores desde 750 partes por millón hasta 1,270 partes por millón en suelos colombianos. En el caso de los Entisoles e Inceptisoles el promedio del contenido de fósforo se encuentra de 125 partes por millón y 700 partes por millón respectivamente, Boschetti et al. (2003).



\*Medias seguidas por la misma letra no difieren significativamente de acuerdo con la prueba de rangos múltiples de Duncan.

**Figura 14.** Fósforo total en los diferentes tratamientos. Finca Doña Amelia-Jaramillo Arriba 2016.

#### 4.2.5.2 Porcentaje de fósforo orgánico e inorgánico.



**Figura 15.** Porcentajes de fósforo orgánico e inorgánico. Finca Doña Amelia-Jaramillo Arriba 2016.

El tratamiento tres, presenta el mayor porcentaje de fósforo orgánico en el suelo refiriéndose a un 42.95 por ciento, tratándose del tratamiento que presenta un mayor nivel de sombra, en el cual la materia orgánica proveniente del componente arbóreo y abonos orgánicos como el lombricompost, juega un papel crucial dentro de la acumulación del fósforo orgánico, los valores de materia orgánica por tratamiento están altamente correlacionados con los porcentajes de fósforo orgánico en los tres tratamientos.

Por otra parte, se presenta mayores porcentaje de fósforo inorgánico en los tres tratamientos, correlacionándolo con la incorporación de fertilizantes de síntesis química, los fósforos solubles son aprovechados por las plantas, se observa que existe gran porcentaje de fósforo inorgánico el cual corresponde a la sumatoria de las formas disponibles de fósforo que incluye PI-Resina, PI-

$\text{NaHCO}_3$ , PI-NaOH y PI-HCl contenidos en el fósforo total de cada tratamiento se mantiene una relación con la cantidad de fertilizante aplicado, ya que en el tratamiento uno y dos se aplica mayor cantidad de fosfatos (18 N – 46  $\text{P}_2\text{O}_5$  – 0  $\text{K}_2\text{O}$ ) al suelo a comparación del tratamiento tres (15 N – 4  $\text{P}_2\text{O}_5$  – 23  $\text{K}_2\text{O}$ ).

Se puede observar en la figura 15, que se da una relación inversa entre las cantidades de fósforo inorgánico y fósforo orgánico, la primera presenta una tendencia descendente, relacionando las cantidades de fósforo inorgánico probablemente a la fertilización química que se le brindan a las parcelas, incorporando a su vez una menor cantidad en las parcelas del tratamiento tres, por ende se presentan menores cantidad de las fracciones inorgánicas de fósforo; las fracciones orgánicas tienen una tendencia ascendente atribuyéndolo a los diferentes tratamientos que corresponden a los distintos grados de sombra, a su vez incorporando la materia orgánica proveniente de la hojarasca del componente arbóreo, en el cual el tratamiento tres, que corresponde al tratamiento totalmente sombreado presenta una mayor cantidad de fósforo orgánico, por otra parte el tratamiento uno que corresponde al tratamiento sin sombra se observó cantidades bajas de fósforo orgánico, y el tratamiento dos parcialmente sombreado, presenta valores medios de la fracción orgánica, correlacionándolo a que en el tratamiento tres se presenta una mayor cantidad de árboles y arbustos que aportan materia orgánica al suelo.

### 4.3 Efecto de la profundidad de muestreo sobre el contenido de fósforo en las fracciones.

**CUADRO IV.** CONTENIDO DE FÓSFORO EN LAS FRACCIONES A DIFERENTES PROFUNDIDADES. FINCA DOÑA AMELIA-JARAMILLO ARRIBA 2016.

Fracciones de Fósforo	Profundidades	
	0-10 cm	10-20 cm
Pi Resina	19.592 a	12.117 a
Pi NaHCO <sub>3</sub>	44.239 a	45.056 a
Pi NaOH	670.74 a	626.10 a
Pi HCl	20.768 a	20.653 a
P Residual	773.46 a	591.75 b
P Orgánico	567.6 a	535.1 a
P Total	2,096.40 a	1,830.8 a

\*Medias seguidas por la misma letra horizontalmente no difieren significativamente al nivel de 5% de probabilidad por la prueba de Duncan.

En el análisis estadístico de las profundidades presentado en el cuadro IV, se pueden observar que a medida que la profundidad aumenta, disminuye la cantidad de fósforo en el suelo, a excepción de las fracciones inorgánicas de fósforo extraído con NaHCO<sub>3</sub> el cual presenta un contenido mayor en el horizonte del suelo de 10 a 20 cm de profundidad con una media de 45.056 partes por millón. A pesar de esto el factor de profundidad no tuvo efecto significativo ( $P > 0.05$ ) sobre las diferentes fracciones de fósforo a excepción del P residual, el cual si presentó un efecto significativo en cuanto a las profundidades de muestreo.

La disminución de fósforo a medida que se aumenta la profundidad del suelo, se le atribuye al tipo de textura del suelo, y a la disminución del contenido de materia orgánica, Fassbender, citado por Mejía (2010), que en su estudio se mostró una tendencia similar, disminuyendo su contenido al aumentar la

profundidad del perfil para los tres sistemas de cultivos de café estudiado. Por otro lado Macedo (1996), en su estudio presento también un aumento de la cantidad de fósforo en el primer horizonte del suelo, relacionándolo, que por tratarse del horizonte orgánico, la cantidad de materia orgánica y la tasa de mineralización, contribuyen a un nivel alto de fósforo en la solución del suelo, y describe que el fósforo disponible presente en los horizontes superficiales, están menos propensos a fijarse en los componentes inorgánicos de la fase sólida del suelo, se encontrara más disponible para las plantas.

## 5. CONCLUSIONES

1. Mediante la implementación de la metodología de fraccionamiento secuencial de fósforo, se pudo realizar la cuantificación de las diferentes fracciones de fósforo, encontrados en un sistema de café arbolado, el cual presentaba diferentes niveles de sombra.
2. La profundidad del perfil, determina el contenido de las diferentes fracciones de fósforo existentes en el suelo, generándose mayor contenido de fósforo en los horizontes superficiales y a medida que se aumenta la profundidad, este contenido va disminuyendo, debido a la disminución en conjunto de la materia orgánica.
3. Los diferentes niveles de sombra que corresponden a los tratamientos mostraron diferencias en el contenido de las fracciones de fósforo, presentándose un mayor contenido de las fracciones inorgánicas, residuales y total en el tratamiento uno, por su parte el tratamiento dos, manifestó valores intermedio de las distintas fracciones de fósforo y el tratamiento tres, obtuvo la media más bajas de los contenidos de fósforo, exceptuando el valor de fósforo orgánico, del cual por tratarse de un nivel de sombra mayor, la presencia de materia orgánica es mayor, aumentando de esta manera esta fracción orgánica, en

comparación al tratamiento uno categorizado sin sombra, obtuvo el valor más bajo de las fracciones orgánicas. En conclusión el efecto de la sombra determinar el contenido de las fracciones orgánicas.

4. Se acepta la hipótesis alternativa, presentándose diferencias en los contenidos de las fracciones de fósforo a diferentes niveles de sombra, existiendo diferencias significativas entre los tratamientos.

Se rechaza la hipótesis alternativa, y se acepta la hipótesis nula, para los contenidos de fósforo a diferentes profundidades de muestreo, no se presentaron diferencias en los contenidos de fósforo a diferentes profundidades de muestreo.

## 6. RECOMENDACIONES

- Mantener un nivel adecuado de las diferentes fracciones de fósforo en el suelo, para contrarrestar la fijación del elemento, mediante la incorporación constante de abonos orgánicos para el incremento de la fracción orgánica, debido a que esta fracción va en aumento en conjunto con el fosforo total, se recomienda a la vez establecer de ser posible en las parcelas el mayor contenido de especies arbóreas y fustales, para el incremento de la materia orgánica y su proceso de mineralización.
- Se recomienda para futuras investigaciones, considerar la variabilidad de las fracciones de fósforo relacionadas a las cantidades de fertilizantes aplicados en el suelo, lo cual se verá reflejado en los resultados. Parte del fósforo presente en el suelo, se encuentra en la fracción de fósforo microbial, el cual no fue considerado dentro de esta investigación, por lo cual se recomienda realizarla en las próximas investigaciones sobre fraccionamiento secuencial de fósforo.
- Establecer un manejo adecuado de la sombra en las áreas de mayor altura, y la posibilidad de incorporar especies arbóreas en las parcelas con menor nivel de sombra, realizando un diseño de la sombra tomando en consideración las especies y la distribución en las parcelas.

## 7. REFERENCIAS CITADAS

ANACAFÉ (Asociación Nacional Del Café). GT. 2007 La Sombra en el cultivo del cafetal. (en línea). Guatemala. Consultado 2 de julio 2016. Disponible en: <http://portal.anacafe.org/Portal/Documents/News/2007-08/104/SombraCafeto2.pdf>

Andrade, H; Ibrahim, M. 2003. ¿Cómo monitorear el secuestro de carbono en los sistemas silvopastoriles?. Agroforestería en las Américas Vol. 10. (En línea). Costa Rica. Consultado 1 de Octubre 2015. Disponible en: <ftp://ftp.fao.org/docrep/nonfao/lead/x6378s/x6378s00.pdf>

Araúz, P. 2013. Fraccionamiento de fósforo en una cronosecuencia de suelos en las dunas del suroeste de Australia. Tesis Lic. Ingeniero en Ambiente y Desarrollo. Jurien, Australia. Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano. 23 Pág.

Arias Jiménez, A. 2007. Suelos Tropicales. Primera Edición. San José. CR. EUNED, 188 páginas.

Boschetti, NG. et al. 2003. Cuantificación de las fracciones orgánicas e inorgánicas de fósforo en suelos de la Mesopotamia Argentina. (En línea). Consultado el 17 de Abril. Disponible en: [http://suelos.org.ar/publicaciones/vol\\_21n1/boschetti\\_1-8.pdf](http://suelos.org.ar/publicaciones/vol_21n1/boschetti_1-8.pdf).

Boyce, J. et al. 1994. Café y desarrollo sostenible: del cultivo agroquímico a la producción orgánica en Costa Rica. Heredia, CR. EFUNA. 248 paginas.

Coste, R. 1969. El Café. Técnicas agrícolas y Producciones tropicales. 1 ed. Trad. Vicente Ripoll. San José. Costa Rica. Editorial Blume. 285 paginas.

Díaz-Romeu, R; Hunter, A. 1978. Metodología de muestreo de suelos, análisis químicos de suelo y tejido vegetal e investigación en invernadero. Turrialba, Costa Rica. CATIE 68 p.

Espinosa, J. 2006. Suelos Volcánicos, Dinámica del fósforo y Producción de Papa. II Congreso Ecuatoriano de la Papa. (En línea). Ambato, Ecuador. Consultado 18 ene. 2016. Disponible en <http://cipotato.org/es/cip-quito/informacion/congresos/ii-congreso-ecuatoriano-de-la-papa/>

Fassbender, HW. Química de suelos con énfasis en suelos de América latina. San José, Costa Rica. Matilde de la Cruz. 398 páginas.

González De León. F. 1997. Efecto de Acacia mangium will como barbecho mejorado, sobre la disponibilidad de fósforo en cultivos posteriores en un ultisol acido. Tesis M.Sc. Turrialba, C.R. CATIE. 86 páginas.

IGNTG (Instituto Nacional Geográfico Tommy Guardia), MOP (Ministerio de Obras Públicas). 2007. Atlas de la República de Panamá. (CD-ROM). Panamá.

INEC (Instituto Nacional de Estadística y Censo), 2015. A veces de cifras: Superficie sembradas y cosecha de café y caña de azúcar y producción de miel y panela: año 2014/15. (En línea). República de Panamá. Consultado 20 de enero de 2016. Disponible en: [https://www.contraloria.gob.pa/inec/Publicaciones/Publicaciones.aspx?ID\\_SUBCATEGORIA=12&ID\\_PUBLICACION=723&ID\\_IDIOMA=1&ID\\_CATEGORIA=4](https://www.contraloria.gob.pa/inec/Publicaciones/Publicaciones.aspx?ID_SUBCATEGORIA=12&ID_PUBLICACION=723&ID_IDIOMA=1&ID_CATEGORIA=4)

Jackson, M.L. 1982. Análisis químico de suelos. Trad. Beltrán M., J. 4 ed. Barcelona. SPA. Ediciones Omega, S.A 662 p.

Lizcano, A. Herrera M.C, Santamaría, J.C. 2006. Suelos Derivados de Ceniza Volcánicas en Colombia. (En línea). Consultado, 29 de Septiembre de 2015. Disponible en: <http://academic.uprm.edu/laccei/index.php/RIDNAIC/article/viewFile/116/115>.

Loría, L. 2015. Antecedentes de uso de hábitat del Mono Cariblanco (*Cebus imitator*) en plantaciones de café bajo sombra en la Provincia de Chiriquí, Panamá. Tesis M.Sc. Santiago. Chile. Universidad de Chile. 52 páginas.

Macedo. J.L. 1996. Efecto de enmiendas orgánicas sobre las formas y la disponibilidad de fósforo en un suelo inceptisol de origen volcánico. Tesis. M. Sc. Turrialba, C.R. CATIE. 47 páginas.

Mejía Umaña, D. M. 2010. Fracciones de fósforo en suelos del valle de Cauca con influencia volcánica, sembrados en Café bajo diferentes sistemas de cultivo. Tesis M. Sc. Palmira, CO. Universidad Nacional de Colombia. 119 páginas.

MIDA (Ministerio de Desarrollo Agropecuario). 2011. Caracterización del sistema productivo de café en tierras altas de la Provincia de Chiriquí. (En línea). Consultado 1 de Octubre 2015. Disponible en:  
[http://www.mida.gob.pa/upload/documentos/tierras\\_altas.pdf](http://www.mida.gob.pa/upload/documentos/tierras_altas.pdf)

Mushler, R. 1999. Árboles en Cafetales. Colección módulos de enseñanzas agroforestal. Modulo No.5. Turrialba, CR. CATIE. 139 paginas.

Negrín Medina M.A, 2005. Especiación de Fósforo en suelos ándicos de las Islas Canarias. Tesis Ph.D. Ciudad de Nancy. F.R. Universidad de Burgos. 229 páginas.

Saiz del Río, J.F; Bornemisza E. 1962. Análisis químico de suelos. Métodos de laboratorios para diagnósticos de fertilidad. 2 ed. Turrialba, Costa Rica, IICA-CTEI. 107 páginas.

Salas, G. 1987. Suelos y ecosistemas forestales, con énfasis en América Tropical. San José. Costa Rica; IICA. 450 paginas.

Sánchez, P. 1981. Suelos del Trópico: Características y Manejo. Traducido por E. Camacho. 1 edición. San José. CR. IICA. 660 páginas.

Sanzano, A. (2010). El Fósforo del Suelo. (En línea). Consultado 2 de Octubre de 2015. Disponible en:

<http://www.edafologia.com.ar/Descargas/Cartillas/Fosforo%20del%20Suelo.pdf>.

Temis, A., López, A., Sosa, M., 2011. Producción de café (*Coffea arabica L.*): cultivo, beneficio, plagas y enfermedades. (En línea). Temas selectos de Ingeniería de alimentos 5-2. Consultado 20 de febrero 2016. Disponible en: [http://www.udlap.mx/WP/tsia/files/No5-Vol-2/TSIA-5\(2\)-Temis-Perez-et-al-2011.pdf](http://www.udlap.mx/WP/tsia/files/No5-Vol-2/TSIA-5(2)-Temis-Perez-et-al-2011.pdf)

Undurraga, D. P. 2004. Conceptos de fertilidad fosfatada en suelos volcánicos. Instituto de Investigaciones Agropecuarias. Centro Regional de Investigación Remehue. (En línea). Consultado: 1 de Octubre de 2015. Disponible en: <http://www2.inia.cl/medios/biblioteca/serieactas/NR25013.pdf>.

## ANEXOS

### Anexo 1. Marcación de parcelas y muestreo de suelo.



## Anexo 2. Tamizado y pesado de las muestras



## Anexo 3. Cuantificación de las fracciones de fósforo

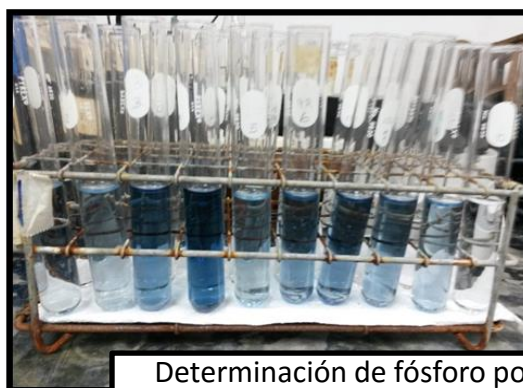
### Anexo 3.1 Fósforo extraído en resinas intercambiadoras de aniones.



Resinas de Intercambio aniónico

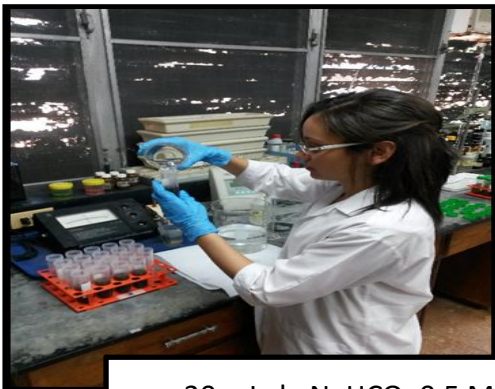


Resinas agitadas con suelo y HCl



Determinación de fósforo por colorimetría.

### Anexo 3.2 Fósforo extraído en Bicarbonato de Sodio



30 mL de  $\text{NaHCO}_3$  0.5 M



Centrifugación de las Muestras



Determinación de fósforo del sobrenadante.

### Anexo 3.3 Fósforo extraído en Hidróxido de Sodio.



Suelo más 30 mL de NaOH



sobrenadante de la centrifugación  
con  $H_2SO_4$



Dilución para la determinación  
de fósforo.

### Anexo 3.4 Fósforo extraído en Ácido clorhídrico

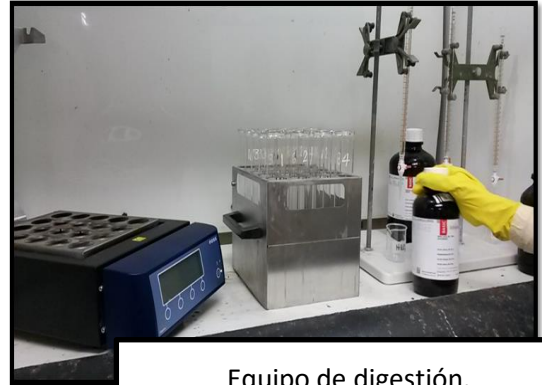


Determinación de fósforo por método  
colorimétrico

### Anexo 3.5 Determinación de Fósforo Residual



Filtración al vacío del suelo para determinar fósforo residual.



Equipo de digestión.



Digestión de las muestras.

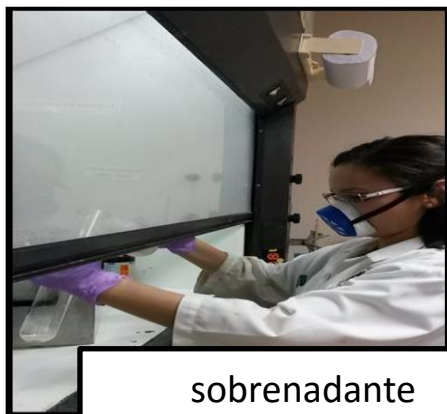
**Anexo 3.6** Fósforo Total extraído por medio de una mezcla acida (Nítrico + Perclórico + sulfúrico ) por digestión.



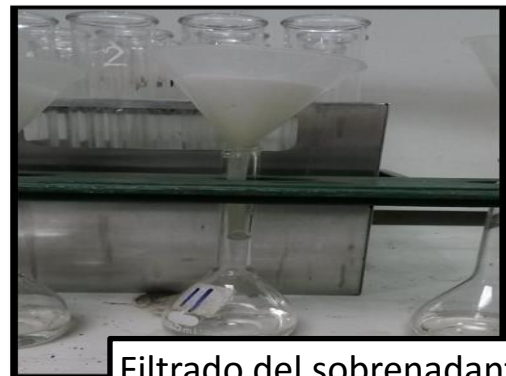
Pesado 0.20 g de suelo



Suelo digerido



sobrenadante



Filtrado del sobrenadante.