

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA  
ESCUELA DE POSGRADO**

**MAESTRÍA EN CIENCIAS AGRÍCOLAS  
MENCIÓN: AGRICULTURA SOSTENIBLE**



**RELACIÓN DE LAS PROPIEDADES EDÁFICAS Y LA  
DISTRIBUCIÓN RADICULAR EN LA PRODUCCIÓN DEL  
CULTIVO DE CAFÉ (*Coffea arabica* L.) EN LA REGIÓN SAN  
MARTÍN**

**TESIS**

**Para optar el grado académico de:**

**MAESTRO EN CIENCIAS AGRÍCOLAS,  
MENCIÓN: AGRICULTURA SOSTENIBLE**

**SELENI VISLAO BENAVIDES**

**Tingo María - Perú**

**2021**



**VICERRECTOR DE INVESTIGACIÓN**  
**OFICINA DE INVESTIGACIÓN**  
**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA**

REGISTRO DE TESIS PARA LA OBTENCIÓN DEL GRADO ACADÉMICO DE MAESTRO

**I. DATOS GENERALES DE POSGRADO**

<b>Universidad</b>	: Universidad Nacional Agraria de la Selva
<b>Escuela de posgrado</b>	: Recursos Naturales Renovables
<b>Maestría</b>	: Ciencias Agrícolas
<b>Mención</b>	: Agricultura Sostenible
<b>Título de tesis</b>	: Relación de las propiedades edáficas y la distribución radicular en la producción del cultivo de café ( <i>Coffea arabica</i> L.) en la región San Martín.
<b>Autor</b>	: Selene Vislao Benavides
<b>Asesor de Tesis</b>	: Dr. Hugo Alfredo Huamani Yupanqui
<b>Programa de Investigación</b>	: Cultivos Tropicales
<b>Línea (s) de Investigación</b>	: Suelos y Fertilizantes
<b>Eje Temático de la Investigación</b>	: Manejo de suelos en el cultivo de café
<b>Lugar de Ejecución</b>	: Provincia de Moyobamba - Región San Martín
<b>Duración</b>	: Setiembre 2017 - mayo 2018.
<b>Financiamiento</b>	: S/.19,078.40
<b>FEDU</b>	: No
<b>Propio</b>	: Si
<b>Otros</b>	: No



**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA**  
**ESCUELA DE POSGRADO**  
**DIRECCIÓN**



*"Año de la lucha contra la corrupción y la impunidad"*

**ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS**  
**Nro. 039-2019-EPG-UNAS**

En la ciudad universitaria siendo las 4:00pm del día jueves 14 de noviembre del 2019, reunidos en la Sala de Grados de la Universidad Nacional Agraria de la Selva, se instaló el Jurado Calificador a fin de proceder a la sustentación de la tesis titulada:

**"RELACIÓN DE LAS PROPIEDADES EDÁFICAS Y LA DISTRIBUCIÓN RADICULAR EN LA PRODUCCIÓN DEL CULTIVO DE CAFÉ (*Coffea arabica* L.) EN LA REGIÓN SAX MARTÍN"**

A cargo del candidato al Grado de Maestro en Ciencias Agrícolas, mención Agricultura, SELENI VISLAO BENAVIDES.

Luego de la exposición y absueltas las preguntas de rigor, el Jurado Calificador procedió a emitir su fallo declarando **APROBADO** con el calificativo de **BUENO**.

Acto seguido, a horas 6:00pm. el presidente dio por culminada la sustentación; procediéndose a la suscripción de la presente acta por parte de los miembros del jurado, quienes dejan constancia de su firma en señal de conformidad.

.....  
Dr. JOSE WILFREDO ZAVALA SOLORZANO  
Presidente del Jurado

.....  
M.Sc. JORGE LUIS ADRIAZOLA DEL AGUILA  
Miembro del Jurado

.....  
M.Sc. FAUSTO SILVA CARDENAS  
Miembro del Jurado



.....  
Dr. HUGO HUAMANI YUPANQUI  
Asesor

## **DEDICATORIA**

A Dios, por darme la oportunidad de vivir y por estar conmigo en cada paso que doy, por fortalecer mi corazón e iluminar mi mente y por haber puesto en mi camino a aquellas personas que han sido mi soporte y compañía durante todo el periodo de estudio.

Con admiración, respeto y amor a mis padres, hermanos y familia, por haberme inculcado ese espíritu de superación constante.

A cada persona que día a día están comprometidos con el sector cafetalero.

## **AGRADECIMIENTOS**

A la Escuela de Posgrado de la Universidad Nacional Agraria de la Selva y a cada uno de los docentes de la Maestría en Ciencias Agrícolas - Mención Agricultura Sostenible, quienes reforzaron mi conocimiento intelectual y humano.

A los miembros del jurado calificador: Dr. José Wilfredo Zavala Solórzano, por su apoyo en la conducción, ejecución, redacción y revisión científica y académica del trabajo de investigación, al M.Sc. Jorge Luis Adriazola Del Águila y M.Sc. Fausto Silva Cárdenas, por sus acertadas opiniones y grandes aportes para asegurar la calidad y el rigor científico de la presente tesis.

Especiales agradecimientos al Dr. Hugo Alfredo Huamaní Yupanqui, asesor de la presente tesis, por su valiosa colaboración en la culminación y mejora del presente trabajo de investigación.

Finalmente, agradezco a todas las personas que de una u otra forma estuvieron conmigo, porque cada una aportó con un granito de arena en sus pertinentes y acertadas opiniones; y es por ello por lo que a todos y cada uno de ustedes les dedico todo el esfuerzo, sacrificio y tiempo que entregué a esta tesis.

## ÍNDICE

	<b>Pág.</b>
I. INTRODUCCIÓN .....	17
II. REVISIÓN DE LITERATURA.....	20
2.1. Generalidades del café ( <i>Coffea arabica</i> L.) .....	20
2.1.1. Importancia del café en el Perú.....	20
2.1.2. Rendimiento del café en el Perú .....	21
2.1.3. Variedades de café .....	22
2.1.4. Características biométricas del cafeto.....	23
2.1.5. Concentración de elementos en las hojas y raíces del café.....	24
2.2. Agricultura orgánica .....	25
2.3. Propiedades del suelo.....	26
2.3.1. Propiedades físicas del suelo .....	26
2.3.2. Propiedades químicas del suelo .....	31
2.3.3. Propiedades biológicas del suelo.....	38
III. MATERIALES Y MÉTODOS.....	41
3.1. Lugar de ejecución .....	41
3.1.1. Ubicación política y geográfica .....	41
3.2. Materiales y equipos .....	42
3.3. Metodología .....	42
3.3.1. Características del campo experimental .....	42
3.3.2. Diseño experimental y componentes en estudio .....	43
3.4. Parámetros de evaluación.....	44

3.4.1. Propiedades físicas del suelo .....	44
3.4.2. Propiedades químicas del suelo .....	46
3.4.3. Parámetros biológicos del suelo .....	47
3.4.4. Evaluación de las características biométricas del cafeto	49
3.4.5. Análisis de la concentración de elementos en las hojas y raíces del café .....	51
3.4.6. Estimación del rendimiento del café.....	52
3.4.7. Análisis correlacional .....	52
IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	53
4.1. Propiedades físicas del suelo .....	53
4.1.1. Porcentajes de arena, limo y arcilla .....	53
4.1.2. Densidad aparente y porosidad total.....	55
4.1.3. Resistencia a la penetración .....	59
4.2. Propiedades químicas del suelo.....	61
4.2.1. pH.....	62
4.2.2. Materia orgánica y nitrógeno.....	64
4.2.3. Fósforo disponible.....	66
4.2.4. Potasio disponible.....	67
4.2.5. Capacidad de intercambio catiónico .....	70
4.2.6. Calcio y magnesio cambiabile .....	71
4.2.7. Saturación de Aluminio .....	73
4.3. Propiedades biológicas del suelo .....	76
4.3.1. Índice de diversidad de Shannon-Wiener para macroorganismos del suelo .....	76

4.4. Características biométricas del cafeto .....	78
4.4.1. Número de ramas .....	79
4.4.2. Profundidad radicular .....	81
4.4.3. Área radicular .....	84
4.4.4. Proyección de la copa.....	85
4.5. Análisis químico de macro y microelementos de las hojas de café .....	87
4.6. Análisis químico de macro y microelementos de las raíces de café .....	91
4.6.1. Sodio, fierro y manganeso en la raíz.....	91
4.7. Rendimiento del cultivo de café en kg/planta y qq/ha <sup>-1</sup> .....	94
4.8. Análisis de correlación .....	97
V. CONCLUSIONES .....	102
VI. RECOMENDACIONES.....	103
VII. BIBLIOGRAFÍA.....	104
VIII. ANEXO.....	123

## ÍNDICE DE CUADROS

<b>Cuadros</b>	<b>Pág.</b>
1. Análisis químico de la hoja del cultivo de café .....	25
2. Extracción de nutrientes por el cultivo de café.....	25
3. Clasificación de la densidad aparente de los suelos.....	28
4. Valores orientativos de la porosidad total de un suelo y su interpretación.....	29
5. Niveles de resistencia del suelo a la penetración.....	31
6. Interpretación del pH. ....	32
7. Niveles de materia orgánica y nitrógeno en el suelo.....	34
8. Niveles de fósforo disponible en el suelo.....	35
9. Niveles de potasio disponible en el suelo. ....	35
10. Ubicación geográfica de cada tratamiento en estudio.....	41
11. Descripción de los tratamientos en estudio.....	43
12. Esquema del análisis de variancia (ANVA).....	44
13. Parámetros físicos del suelo.....	44
14. Parámetros químicos del suelo.....	47
15. Prueba de Duncan ( $\alpha = 0.05$ ) de los tratamientos para los porcentajes de arena, limo y arcilla del suelo. ....	54
16. Prueba de Duncan ( $\alpha = 0.05$ ) de los tratamientos para la densidad aparente y porosidad total del suelo. ....	56
17. Prueba de Duncan ( $\alpha = 0.05$ ) de los tratamientos para la resistencia del suelo a la penetración.....	59

<b>18.</b> Prueba de Duncan ( $\alpha = 0.05$ ) de los tratamientos para el pH del suelo.....	62
<b>19.</b> Prueba de Duncan ( $\alpha = 0.05$ ) de los tratamientos para la materia orgánica y el nitrógeno del suelo. ....	65
<b>20.</b> Prueba de Duncan ( $\alpha = 0.05$ ) de los tratamientos para el fósforo disponible del suelo. ....	67
<b>21.</b> Prueba de Duncan ( $\alpha = 0.05$ ) de los tratamientos para el potasio disponible del suelo. ....	69
<b>22.</b> Prueba de Duncan ( $\alpha = 0.05$ ) de los tratamientos para el Ca y Mg cambiante del suelo. ....	72
<b>23.</b> Prueba de Duncan ( $\alpha = 0.05$ ) de los tratamientos para la saturación de Al del suelo. ....	75
<b>24.</b> Prueba de Duncan ( $\alpha = 0.05$ ) de los tratamientos para el número de ramas. ....	80
<b>25.</b> Prueba de Duncan ( $\alpha = 0.05$ ) de los tratamientos para la profundidad radicular.....	82
<b>26.</b> Prueba de Duncan ( $\alpha = 0.05$ ) de los tratamientos para la proyección de la copa.....	86
<b>27.</b> Prueba de Duncan ( $\alpha = 0.05$ ) de los tratamientos para sodio, hierro y manganeso en la raíz. ....	92
<b>28.</b> Rendimiento del cultivo de café en kg/planta y qq/ha <sup>-1</sup> . ....	96
<b>29.</b> Coeficientes de correlación para el rendimiento y las características biométricas del cafeto.....	98

<b>30.</b> Resumen del análisis de variancia de las propiedades físicas del suelo.....	138
<b>31.</b> Resumen del análisis de variancia de las propiedades químicas del suelo.....	138
<b>32.</b> Resumen del análisis de variancia de las propiedades biológicas del suelo.....	139
<b>33.</b> Resumen del análisis de variancia de las características biométricas del cafeto.....	139
<b>34.</b> Resumen del análisis de variancia de los macro y microelementos de las hojas de café 1.....	140
<b>35.</b> Resumen del análisis de variancia de los macro y microelementos de las hojas de café 2.....	140
<b>36.</b> Resumen del análisis de variancia de los macro y microelementos de las raíces de café 1.....	141
<b>37.</b> Resumen del análisis de variancia de los macro y microelementos de las raíces de café 2.....	141
<b>38.</b> Resumen del análisis de variancia del rendimiento del café en kg/planta y qq/ha <sup>-1</sup> .....	142
<b>39.</b> ANVA de correlación de rendimiento y diámetro de tallo. ....	142
<b>40.</b> ANVA de correlación de altura de planta. ....	143
<b>41.</b> ANVA de correlación de longitud de la rama más grande y área radicular.....	143
<b>42.</b> ANVA de correlación del número de ramas y profundidad radicular. ....	144
<b>43.</b> Grupos taxonómicos de la macrofauna del suelo. ....	145

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figuras</b>	<b>Pág.</b>
1. Triángulo textural del suelo mostrando los porcentajes de arena, limo y arcilla de las clases texturales (Usda 1999). .....	27
2. Relaciones de interacción entre los macro y microorganismos del suelo.....	40
3. Monolito de 25 x 25 x 20 cm. ....	48
4. Porcentajes de arena, limo y arcilla del suelo. ....	54
5. Densidad aparente y porosidad total del suelo. ....	58
6. Resistencia del suelo a la penetración.....	61
7. Reacción del suelo (pH). ....	63
8. Materia orgánica y nitrógeno del suelo. ....	65
9. Fósforo disponible del suelo. ....	67
10. Potasio disponible del suelo. ....	69
11. Capacidad de intercambio catiónico del suelo. ....	71
12. Calcio y magnesio cambiante del suelo. ....	73
13. Saturación de Aluminio del suelo.....	75
14. Índice de diversidad de Shannon-Wiener para los macroorganismos del suelo.....	78
15. Número de ramas.....	81
16. Profundidad radicular.....	84
17. Área radicular. ....	85
18. Proyección de la copa. ....	87
19. Análisis químico de macro y microelementos de las hojas de café. ..	90

<b>20.</b> Sodio, fierro y manganeso en la raíz. ....	94
<b>21.</b> Rendimiento del cultivo de café en kg/planta y qq/ha <sup>-1</sup> . ....	97
<b>22.</b> Identificación de tratamientos .....	124
<b>23.</b> Calicata del tratamiento T <sub>1</sub> (Catimor - 3 años) R1 .....	124
<b>24.</b> Calicata del tratamiento T <sub>2</sub> (Catimor - 4 años) R3.....	125
<b>25.</b> Calicata del tratamiento T <sub>3</sub> (Catimor - 5 años) R3.....	125
<b>26.</b> Calicata del tratamiento T <sub>4</sub> (Caturra - 3 años) R1 .....	126
<b>27.</b> Distribución radicular de T <sub>4</sub> (Caturra - 3 años) R3.....	126
<b>28.</b> Profundidad y área radicular del tratamiento T <sub>3</sub> (Catimor - 5 años) R2.....	127
<b>29.</b> Profundidad y área radicular del tratamiento T <sub>6</sub> (Caturra - 5 años) R3. .....	127
<b>30.</b> Distribución de las raíces en el plano cartesiano T <sub>3</sub> (Catimor - 5 años) R2.....	128
<b>31.</b> Digitalización de las raíces. ....	128
<b>32.</b> Proyección de la copa .....	129
<b>33.</b> Sistema agroforestal.....	129
<b>34.</b> Análisis de suelos 1 .....	130
<b>35.</b> Análisis de suelos 2.....	131
<b>36.</b> Análisis especial del tejido foliar de café 1 .....	132
<b>37.</b> Análisis especial del tejido foliar de café 2.....	133
<b>38.</b> Análisis especial del tejido radicular 1 .....	134
<b>39.</b> Análisis especial del tejido radicular 2. ....	135
<b>40.</b> Mapa de ubicación del trabajo de investigación.....	136

<b>41. Croquis de la parcela experimental.....</b>	<b>137</b>
--	------------

## RESUMEN

La investigación se llevó a cabo en áreas de influencia de productores de café del centro poblado de Nuevo San Miguel, distrito de Jepelacio, provincia de Moyobamba y departamento de San Martín. Con la finalidad de evaluar la relación de las propiedades edáficas y la distribución radicular en la producción del cultivo de café variedad Catimor y Caturra 3, 4, 5 años. Se utilizó el diseño de bloques completamente al azar (DBCA) con 6 tratamientos y 3 repeticiones. Luego se aplicó la prueba de Duncan ( $\alpha=0.05$ ), y para la correlación se utilizó el programa libre SPSS21. Donde se llegó a las siguientes conclusiones: i). La mayoría de los suelos fueron de característica arcillosa, de baja fertilidad química y biológicamente los suelos estuvieron representados por el orden Haplotaxida, Isopoda e Hymenoptera. ii). Con respecto a la profundidad radicular los tratamientos T<sub>6</sub> (Caturra - 5 años), T<sub>4</sub> (Caturra - 3 años), T<sub>1</sub> (Catimor - 3 años) y T<sub>3</sub> (Catimor - 5 años) presentaron la mayor longitud vertical, sin diferenciarse estadísticamente entre ellos, mientras que para el área radicular los tratamientos no presentaron significación estadística. iii). Los tratamientos T<sub>3</sub> (Catimor - 5 años) y T<sub>6</sub> (Caturra - 5 años) presentaron los más altos rendimientos con 52.67 y 49.33 qq/ha<sup>-1</sup>. iv). Según el análisis de regresión lineal múltiple se determinó el siguiente modelo matemático para el rendimiento de café (qq/ha<sup>-1</sup>) = -13.687 + 11.977 edad + 0.008 K disponible + 4.991 área de la proyección de la copa.

**Palabras claves:** Café, rendimiento, distribución radicular, propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo.

## ABSTRACT

The research took place in influential areas for coffee producers in the town of Nuevo San Miguel, Jepelacio district, Moyobamba province, San Martin department, Peru. The purpose was to evaluate the relationship of the edaphic properties and the root distribution during production of the Catimor and Caturra varieties of coffee crops at three, four and five years of age. The completely randomized block design was used (CRBD; DBCA in Spanish) with six treatments and three repetitions. Later, the Duncan test was applied ( $\alpha=0.05$ ), and for the correlation, the SPSS21 free program was utilized. The following conclusions were reached: i) the majority of the soil had characteristics of being clay like, of low chemical fertility, and biologically the soil was represented by the Haplotaxid, Isopod and Hymenoptera orders; ii) with respect to the root depth for the treatments, T<sub>6</sub> (5 year old Caturra), T<sub>4</sub> (3 year old Caturra), T<sub>1</sub> (3 year old Catimor) and T<sub>3</sub> (5 year old Catimor) presented the greatest vertical length, with no statistical differences between them, while, for the root area, there was no significant statistic among the treatments; iii) treatments T<sub>3</sub> (5 year old Catimor) and T<sub>6</sub> (5 year old Caturra) presented the highest yields at 52.67 and 49.33 Q/ac<sup>-1</sup>; iv) according to the multiple linear regression analysis, the following mathematical model was determined for the yield of the coffee (Q/ac<sup>-1</sup>) = -13.687 + 11.977 age + 0.008 available K + 4.991 projected area of the canopy.

**Keywords:** coffee, yield, root distribution, physical properties, chemistry and biology of the soil.

## I. INTRODUCCIÓN

El café es el “principal producto agrícola de exportación” en el Perú. Sin embargo, el rendimiento del café por hectárea en el Perú es considerado bajo. Se han alcanzado valores muy significativos en los años 2006 y 2011, por arriba de los 800 kg/ha, aunque la media nacional en los últimos años ha ido disminuyendo hasta los 500 kg/ha. No obstante, a partir de la campaña 2015 se viene recuperando tanto en el rendimiento como en la calidad organoléptica (Díaz y Carmen 2017). De acuerdo con el Minagri (2018), los bajos rendimientos (13 qq/ha<sup>-1</sup>) en el Perú son uno de los factores de mayor preocupación en materia de “política agraria”. Teniendo en cuenta la escasa capacidad técnica de los agricultores, la elevada incidencia de plagas y enfermedades y la deforestación en las chacras han sido reconocidas como las principales causas que explican los bajos niveles de producción, productividad, sostenibilidad ambiental en el Perú.

Sánchez (2015) indica que el cultivo de café se desarrolla principalmente en suelos de textura franco, con una profundidad efectiva mayor a 50 cm, buena permeabilidad y adecuado drenaje natural. En cuanto a las características químicas del suelo el pH debe estar entre 4.5 - 5.5, materia orgánica de 2.5 - 3.5 %, además de un alto suministro de N, P y K para producir cosechas rentables. De acuerdo con Castañeda (1997) citado por Contreras (2009), el porcentaje de extracción de nutrientes por las hojas de café son altas; cuando estas caen al suelo y mediante el proceso de descomposición se reincorporan nuevamente al suelo. Lo que extrae el tallo, raíz y las ramas componen el esqueleto de la planta. Cuando se realiza la cosecha los “elementos minerales” que conforman los frutos

no son repuestos al suelo, y si no se realiza una fertilización oportuna las reservas del suelo se van agotando lentamente.

La raíz es el órgano que desempeña un papel fundamental en el crecimiento y desarrollo de la planta, su función es absorber y transportar agua y nutrientes. En el caso del cafeto la mayor cantidad de raíces activas se encuentra a los 10 cm de profundidad y se extiende de 1.0 hasta 1.5 m desde el tronco. El 86 % de raíces absorbentes y 89.9 % de raíces totales del cafeto se encuentra a los 30 cm de profundidad, a esta profundidad del suelo las raíces necesitan buena disponibilidad de agua y minerales esenciales (Arcila 2007a). Muchos son los factores que obstaculizan el crecimiento y desarrollo radicular, según el Usda (1999), a medida que incrementa la profundidad del suelo aumenta la densidad aparente, por lo tanto, se reducirá el crecimiento vertical de las raíces. Además, cuando los suelos presentan pH muy ácidos, alta saturación de aluminio (mayor a 60 %), niveles bajos en materia orgánica y bajo contenido de fósforo se produce un deficiente desarrollo radicular (Arcila 1992).

Por lo que se planteó la siguiente interrogante: ¿En qué medida las propiedades edáficas contribuyen a una mayor distribución radicular para obtener altos rendimientos en el cultivo de café? Lo que nos llevó a formular la siguiente hipótesis: Las propiedades edáficas contribuyen a una mayor distribución radicular para obtener altos rendimientos en el cultivo de café; persiguiendo los siguientes objetivos:

### **1.1. Objetivo General:**

Determinar la relación de las propiedades edáficas y la distribución radicular en la producción del cultivo de café (*Coffea arabica* L.) en la región San Martín.

### **1.2. Objetivos Específicos:**

1. Determinar las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo.
2. Evaluar las propiedades biométricas del cafeto y determinar la concentración de elementos en la hoja y raíz del café
3. Determinar el rendimiento del cultivo de café en la variedad Catimor y caturra 3, 4 y 5 años.
4. Evaluar la correlación entre las propiedades edáficas, distribución radicular con el rendimiento del cultivo de café.

## II. REVISIÓN DE LITERATURA

### 2.1. Generalidades del café (*Coffea arabica* L.)

El cafeto taxonómicamente pertenece a la familia Rubiaceae y al género *Coffea*, siendo las especies *C. canéfora* y *C. arabica* las más importantes en la economía mundial (Puerta 1998). El cultivo de café se desarrolla principalmente en las zonas altitudinales de 900 - 2 000 msnm, con temperatura media de 17 y 23 °C, la radiación solar de 300 - 450 cal.cm<sup>2</sup>, con precipitación pluvial anual de 1 800 a 4 000 mm/año, humedad relativa de 70 - 80 %, evapotranspiración diaria de 3 - 4 mm y vientos menores a 5 km/hora (Sánchez 2015).

#### 2.1.1. Importancia del café en el Perú

El café es el “principal producto agrícola de exportación” en nuestro país. De acuerdo con el Censo Nacional Agropecuario (Inei 2012), aproximadamente 223 mil familias están involucradas en la cadena productiva del café. Un total de 425 400 hectáreas son cultivadas en 15 departamentos, 95 provincias y 450 distritos. Sin embargo, el 91 % del total de caficultores y del área cultivable se concentran en los departamentos de Junín, San Martín, Cajamarca, Cuzco, Amazonas, Huánuco y Pasco (Díaz y Carmen 2017).

El Perú es considerado uno de los países con las mejores condiciones climáticas y geográficas para la producción de cafés de alta calidad, pudiéndose convertirse en uno de los mayores productores de café en el mundo. También el Perú es reconocido a nivel mundial por la calidad en la producción de cafés orgánicos (Marcelo *et al.* 2018). Actualmente, el Perú se encuentra en el segundo lugar a nivel mundial en la producción de café orgánico; se entiende

por “producción orgánica” de café a la agricultura de especialización y diferenciación de la producción de commodities (Nahuamel 2018).

### **2.1.2. Rendimiento del café en el Perú**

Díaz y Carmen (2017) indican que el rendimiento de café por hectárea en el Perú es considerado bajo. Sin embargo, se han alcanzado picos muy significativos en los años 2006 y 2011, por encima de los 800 kg/ha, aunque la media nacional en los últimos años ha ido disminuyendo hasta los 500 kg/ha. Pero a partir de la campaña 2015 se viene recuperando.

Minagri (2018) señala que los bajos rendimientos ( $13 \text{ qq/ha}^{-1}$ ) en el Perú son uno de los factores de mayor preocupación en materia de “política agraria”. Teniendo en cuenta la escasa capacidad técnica de los agricultores, la elevada incidencia de plagas y enfermedades y la deforestación en las chacras han sido reconocidas como las principales causas que explican los bajos niveles de producción, productividad, sostenibilidad ambiental en el Perú.

Por otro lado, Arcila (2007b) señala que el rendimiento está influenciado por la genética de la planta, condiciones edafoclimáticas y por las prácticas de cultivo. Cuando las condiciones son favorables, se logra una “máxima producción”. Sin embargo, existen factores que limitan la producción del café como la disponibilidad de agua y nutrientes. También existen otros factores que reducen la producción del café, entre ellos se encuentran las malezas, los problemas fitosanitarios (plagas y enfermedades).

### 2.1.3. Variedades de café

#### a. Caturra

Benegas (2009) indica que la variedad caturra es oriunda de Brasil, “mutación enana del Bourbon”, se identifica por sus entrenudos cortos, dándole un porte bajo a la planta, su tronco es grueso, sus ramas laterales son numerosas con abundantes ramificaciones secundarias que dan a la planta una apariencia vigorosa y frondosa. Cicafé (2011) señala que las hojas se caracterizan por ser grande, ancha y oscura, los frutos son de tamaño considerable. Mientras tanto, el sistema radicular está muy bien desarrollado y es de mayor extensión y densidad. Esta variedad es de adaptación muy amplia, especialmente en cuanto a la altitud (msnm). Su “potencial productivo” es muy destacado, se logra sembrar hasta 5 000 plantas/ha<sup>-1</sup>, aunque en condiciones muy favorables para el cultivo la densidad de siembra puede incrementarse.

#### b. Catimor

La variedad Catimor es originaria del cruce de la “variedad caturra rojo con el híbrido de Timor”, dicho híbrido se le conoce por tener genes de resistencia a la roya amarilla (*Hemileia vastarix*) (Fischersworing y Robkamp 2001 citado por Benegas 2009). La planta se caracteriza por tener un porte bajo, tronco de grueso a intermedio, posee un gran número de ramas laterales, creando una copa medianamente fornida y compacta. Son considerados precoces y productivos, su rendimiento es superior con respecto a otras variedades comerciales (Zamora 1998).

#### 2.1.4. Características biométricas del café

**Altura:** El crecimiento ortotrópico del café es afectado por las “células meristemáticas” situadas en el ápice del tallo. El crecimiento es más activo cuando hay un buen suministro de energía solar, agua y nutrientes (Arcila 2007a). Esta característica varía ampliamente y está determinado por la variedad. Sin embargo, las condiciones edafoclimáticas son factores esenciales para el crecimiento: por ejemplo, el crecimiento es mucho más activo en las épocas de lluvia (Zelaya y Sotelo 2000). Los mismos autores señalan que el café a la edad de 5 años concluye su mayor crecimiento ortotrópico.

**Diámetro del tronco:** Los cafetales bajo sombra se caracterizan por tener plantas con mayor altura y menor diámetro de tallo, debido a que las plantas están compitiendo por luminosidad con los árboles de sombra, mientras que los cafetales expuestos a pleno sol no compiten por la luminosidad y su desarrollo lo hace en el tallo y en las ramas totales y productivas (Llanco 2014).

**Ramas:** El número de ramas es un distintivo morfológico del café que afecta a la productividad. Se originan a partir de las yemas laterales responsables del crecimiento plagiotrópico. Cuando hay un buen suministro de nutrientes, agua y luz el crecimiento de ramas es más activo (Arcila 2007a). Las ramas laterales o plagiotrópicas, denominadas bandolas, son las ramas primarias que originan las ramas secundarias, de las que a su vez pueden producir ramillas terciarias. Las ramas laterales se prolongan y la parte superior del eje vertical continúa creciendo, por lo tanto, se producen nuevas ramas en diversos ángulos, por lo que la planta consigue una forma cónica (Alarcón 2016).

**Proyección de la copa:** Esta característica es muy importante para establecer el distanciamiento de siembra del cafeto; la longitud horizontal de las raíces es proporcional a la proyección de la sombra de la planta, cuando el cafeto proyecta buena sombra y está sembrada a una distancia corta existirá competencia de nutrientes entre las raíces y luz entre la parte aérea ya que estas también se entrecruzarían (Fournier 1988 citado por Balladares *et al.* 2005).

**Raíz:** La mayor proporción de raíces se localizan a los 10 cm de profundidad del suelo, donde se efectúa los procesos fisiológicos de la planta como la absorción de agua y nutrientes (López 2012; Ronchi *et al.* 2015). La limitación en el espacio de enraizamiento afecta el crecimiento radical, cuando estas no evidencian obstáculos para llegar al fondo muestran mayor longitud de la raíz pivotante, biomasa radical y volumen de raíces (Gil y Díaz 2016). Usda (1999) considera que hay una relación entre la densidad aparente del suelo y el crecimiento radicular: a medida que incrementa la profundidad del suelo aumenta la densidad aparente, por lo tanto, limita el crecimiento vertical de la raíz. Además, cuando los suelos presentan alta saturación de aluminio (mayor a 60 %), pH muy ácidos, bajo contenido de materia orgánica y bajo contenido de fósforo en el suelo producen un deficiente desarrollo radicular (Arcila 1992).

#### **2.1.5. Concentración de elementos en las hojas y raíces del café**

La cantidad de nutriente acumulado por el café varía según la época del año, edad, órganos y tejidos de una misma planta. En el Cuadro 1, se puede observar la concentración de elementos en el tejido foliar del café en los niveles alto, bajo y medio. En condiciones adecuadas las plantas poseen

concentraciones determinadas de nutrientes; sin embargo, disminuye cuando hay deficiencia o incrementan cuando hay un exceso.

**Cuadro 1.** Análisis químico de la hoja del cultivo de café

Elementos	Bajo	Medio	Alto
N (%)	< 2.00	2.00 - 2.50	mayor de 2.50
P (%)	< 0.08	0.12 - 0.15	de 0.15 a más
K (%)	< 0.50	1.50 - 2.00	de 2.50 a más
Ca (%)	< 0.80	1.00 - 1.50	1.50 a más
Mg (%)	< 0.25	0.25 - 0.30	de 0.30 a más

Fuente: Figueroa *et al.* (1996).

En el Cuadro 2 se muestra la extracción de nutrientes por el cultivo de café para un rendimiento de 20 qq/ha<sup>-1</sup>.

**Cuadro 2.** Extracción de nutrientes por el cultivo de café

Partes de la planta	N	P	K	Ca	Mg
	kg/ha <sup>-1</sup>				
Tallo y raíz	15	2	25	9	2
Ramas	14	2	20	6	3
Follaje	53	11	45	18	7
Frutos Maduros	30	3	35	3	3
Total	112	18	125	36	15

Fuente: Castañeda (1997).

## 2.2. Agricultura orgánica

La agricultura orgánica es una “estrategia de desarrollo” con la finalidad de cambiar algunas de las limitaciones halladas en la agricultura convencional. Más que una “tecnología de producción”, la agricultura orgánica se basa en el manejo y protección de los recursos naturales e impulsar el uso de los insumos locales, pero también se fundamenta en la elaboración de productos con valor

agregado y una cadena de comercialización más justa (Soto 2003). La agricultura orgánica se caracteriza por su aplicación de métodos en armonía con el medio ambiente, restringe el uso de insumos de síntesis química. Los principales motivos para practicar la agricultura orgánica es la preocupación por la salud humana, la protección del medio ambiente y los mayores beneficios que esta proporciona (Céspedes 2005). Actualmente, los productores orgánicos construyen nuevas tecnologías, utilizando el conocimiento de los saberes tradicionales y el resultado de la investigación científica. Por ejemplo, cada año se produce una cantidad enorme de residuos orgánicos, el uso de estos residuos como medio eficiente de reciclaje racional de nutrimentos, mediante su transformación en “abonos orgánicos”, favorece el crecimiento y desarrollo de las plantas y ayuda a mejorar las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo (Ramos y Terry 2014).

Específicamente, el “café orgánico” se caracteriza por ser un café sustentable, se produce sin necesidad de aplicar pesticidas ni fertilizantes sintéticos, con la finalidad de conservar la salud del productor y del consumidor y fomentar la protección del medio ambiente (Castro *et al.* 2004).

## **2.3. Propiedades del suelo**

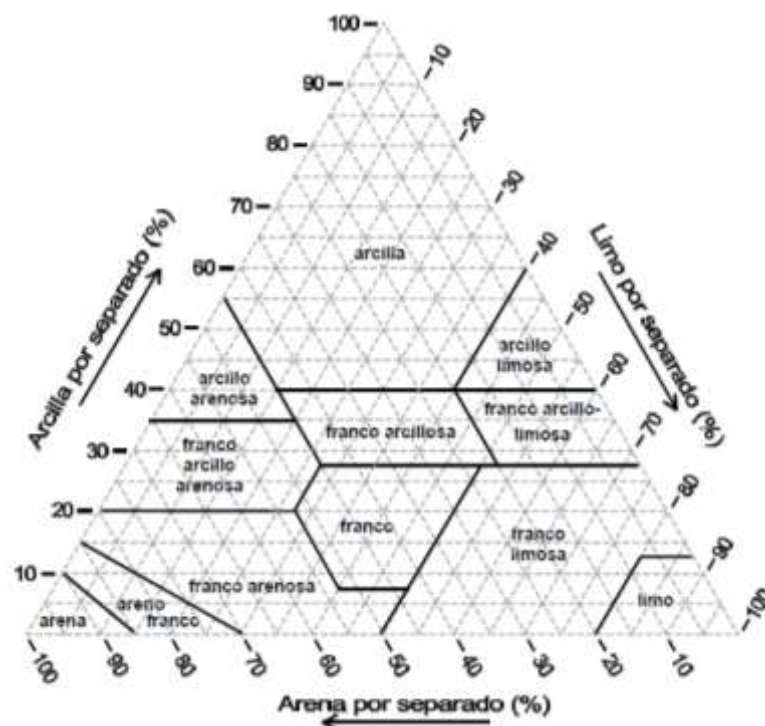
### **2.3.1. Propiedades físicas del suelo**

#### **a. Textura del suelo**

Usda (1999) indica que la textura es la propiedad física más estable, pudiendo solo ser modificada ligeramente por la cultivación y otras prácticas que ocasionan la mezcla de las diferentes capas del suelo. La textura es importante en la fertilidad y el movimiento del agua en el suelo, la laborabilidad

y la amplitud de la aireación. Además, se considera que un suelo posee “buena textura” cuando la proporción de los elementos dan la posibilidad de ser un buen soporte para fijar el sistema radicular de las plantas (Rucks *et al.* 2004).

Navarro y Navarro (2000) señalan que, el suelo tiene una tendencia congénita a ser arcilloso, limoso o arenoso, según sea la roca madre. En la Figura 1, se observa el triángulo textural del suelo mostrando los porcentajes de arena, limo y arcilla de las clases texturales:



**Figura 1.** Triángulo textural del suelo mostrando los porcentajes de arena, limo y arcilla de las clases texturales (Usda 1999).

### b. Densidad aparente

La densidad aparente (DA) es la relación entre el peso seco de una muestra de suelo y el volumen que esa muestra ocupa en el suelo (Rucks *et al.* 2006). El volumen total del suelo corresponde al ocupado por las partículas sólidas y el espacio poroso. Se expresa en  $\text{g/cm}^3$  (Ferreyra y Selles 2013). La

DA está relacionada con la textura, estructura, contenido de materia orgánica, humedad y el grado de compactación (Jaramillo 2002).

En un suelo arenoso la DA es alta, mientras que en un suelo arcilloso la DA es baja, siempre que este último no se encuentre compactado. La DA también puede ser alterada por las labores agrícolas: ya sea reduciéndola o incrementándola (compactación) (Ferreyra y Selles 2013). La densidad aparente es definida por la siguiente expresión:

$$DA = \frac{MS}{VT}$$

Donde:

MS: Masa del suelo seco (g)      VT: Volumen total (cm<sup>3</sup>)

**Cuadro 3.** Clasificación de la densidad aparente de los suelos.

Unidad de la densidad aparente (g/cm <sup>3</sup> )	Clasificación
< 1	Muy bajo
1 - 1.2	Bajo
1.2 - 1.45	Medio
1.45 - 1.60	Alto
> 1.60	Muy alto

Fuente: Cairo (1995) citado por Castillo (2005).

### c. Porosidad total

La porosidad total hace referencia a la fracción de volumen del suelo que es ocupada por el aire o agua y se puede estimar a partir de la DA del suelo (Ferreyra y Selles 2013). La distribución del espacio poroso es afectada por la composición y arreglo de la fracción sólida, es decir, del contenido de materia orgánica, textura y estructura (Jaramillo 2002). El mismo autor define dos tipos de espacios porosos:

- **Microporos:** Está compuesta por el volumen de poros más pequeños que posee el suelo y que, en su mayor conjunto se encuentra en el interior de los peds. Estos poros son encargados de almacenar agua en el suelo.
- **Macroporos:** Son los poros de gran tamaño, los cuales se encuentran en mayor proporción, situados entre los peds. Estos poros son responsables del movimiento del agua, sobre todo cuando hay en abundancia, y del aire en el suelo.

Ferreya y Selles (2013) definen la porosidad total con la siguiente expresión:

$$P (\%) = 100 \times \left(1 - \frac{DA}{DR}\right)$$

Donde:

DA: Densidad aparente (g/cm<sup>3</sup>)

DR: densidad real (g/cm<sup>3</sup>)

**Cuadro 4.** Valores orientativos de la porosidad total de un suelo y su interpretación.

Porosidad total (%)	Interpretación
< 30	Muy baja
30 – 40	Baja
40 – 50	Media
50 – 60	Alta
> 60	Muy alta

Fuente: Flores y Alcalá (2010).

#### **d. Resistencia a la penetración**

Es un indicador de la compactación del suelo (Cortés *et al.* 2013), tiene la finalidad de determinar si hay restricción en el crecimiento radicular (Jaramillo 2002), está íntimamente relacionada con la densidad aparente y con el nivel de humedad en el suelo. Se mide con el aparato denominado penetrómetro y se expresa en  $\text{kg/cm}^2$  (Intagri 2017).

La compactación de suelos es uno de los “procesos de degradación física” más común en suelos agrícolas (Reyes 2010). Se dice que el suelo está compactado cuando la proporción del espacio poroso y porción sólida del suelo no es apropiada para el establecimiento de los cultivos, ya que frena la infiltración del agua y provoca sequía inducida (Peralta y Carrasco 1990). De acuerdo con Flores y Alcalá (2010), la compactación del suelo está influenciada por la textura, estructura, tipo y contenido de los coloides orgánicos y contenido de humedad. Cuando se reduce la humedad, el suelo pierde adherencia y plasticidad tornándose blando y desmenuzable, y cuando se seca, se torna duro y coherente.

Ferreras *et al.* (2007) concluyeron que los suelos que evidencian pérdida de carbono y la estabilidad estructural son susceptibles a incrementar la resistencia a la penetración en los suelos subtropicales, y los suelos que presentan mejores características de estructuración y menor compactación muestran mejor comportamiento frente a factores de degradación.

**Cuadro 5.** Niveles de resistencia del suelo a la penetración.

<b>Kg/cm<sup>2</sup></b>	<b>Niveles de resistencia</b>
< 1	Suelo muy suave
1 – 2	Suelo suave
2 – 3	Suelo duro
3 – 4	Suelo muy duro
> 4	Suelo extremadamente duro

Fuente: Ict (2004) citado por Quispe (2013).

### **2.3.2. Propiedades químicas del suelo**

#### **a. pH**

El pH es un indicador de la “acidez o alcalinidad del suelo”, afecta la disponibilidad de los nutrientes, la actividad microbiana y la solubilidad de los minerales en el suelo. La temperatura y las precipitaciones son factores que afectan el pH del suelo, que controlan la intensidad del lixiviado y la meteorización de los minerales del suelo (Usda 1999).

La acidez de los suelos es afectada por la precipitación: El agua pasa a través del perfil del suelo arrastrando a los cationes de intercambio principalmente los que se encuentran menos fuertemente ligados a la arcilla como el potasio (K) y sodio (Na), dejando lugar a cationes de mayor fuerza iónica como el aluminio (Al) e hidrogeno (H). Los altos contenidos de materia orgánica, al momento de descomponerse con la ayuda de los microorganismos producen dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), que fácilmente se transforma en bicarbonato (HO<sub>3</sub><sup>-</sup>)” (Bernier y Alfaro 2006). Adicionalmente, la oxidación del azufre, nitrificación del amonio (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>) y la liberación de H<sup>+</sup> por las raíces cuando absorben Ca<sup>++</sup>, Mg<sup>++</sup> y K<sup>+</sup>, causan la acidez del suelo (Sadeghian 2016).

El pH se mide en una “escala de 1 hasta 14”. Donde 7 es la mitad y se interpreta como pH neutro, el contenido de hidrógeno ( $H^+$ ) en la solución suelo es equivalente al contenido de hidróxidos ( $OH^-$ ). Cuando el pH está por debajo de 7 se le denomina suelo ácido, y cuando el pH está por encima de 7, el suelo es considerado alcalino o básico (Toledo 2016).

**Cuadro 6.** Interpretación del pH.

<b>Según Scheffe y Schachtschabel</b>	<b>pH en KCl</b>	<b>UNALM</b>	<b>pH en agua</b>
Extremadamente ácido	4	Fuertemente ácido	< 5.5
Fuertemente ácido	4.0 - 4.9	Moderadamente ácido	5.5 - 6.0
Medianamente ácido	5.0 - 5.9	Ligeramente ácido	6.1 - 6.5
Ligeramente ácido	6.0 - 6.9	Neutro	7.0
Neutro	7.0	Ligeramente alcalino	7.2 - 7.8
Ligeramente alcalino	7.1 - 8.0	Moderadamente alcalino	7.9 - 8.4
Mediana alcalino	8.1 - 9.0	Fuertemente alcalino	> 8.5
Fuertemente alcalino	9.1 - 10		
Extremadamente alcalino	> 10		

Fuente: Laboratorio de Análisis de Suelos, Agua y Ecotoxicología de la UNAS.

### **b. Materia orgánica y Nitrógeno**

La materia orgánica (M.O) del suelo está conformado por residuos de plantas y animales en diferentes estados de descomposición, que se almacenan tanto en la superficie como dentro del perfil del suelo (Wolff y Ovalle 2016). Durante la transformación de la M.O en el suelo se diferencian dos fases: la humificación y la mineralización (Julca *et al.* 2006). Por otro lado, la M.O influye en las propiedades físicas del suelo, mejoran la estructura, reduce la densidad aparente, incrementa la porosidad, aireación e infiltración y retención de agua (Trinidad y Velasco 2016). Además, la M.O aporta nutrientes (N, P y S

principalmente), incrementa el valor de la CIC (capacidad de intercambio catiónico), por 1 g de carbono orgánico proporciona de 3 a 4 meq a la CIC. Incrementa el pH del suelo. Es la fuente principal de energía para los organismos del suelo (Jaramillo 2002).

La M.O es la reserva importante de nitrógeno (N) en el suelo. Del total de N que hay en el suelo, alrededor del 98 % se halla formando compuestos orgánicos. Dependiendo del contenido de M.O, a los 20 cm de profundidad del suelo se puede encontrar entre 1 000 - 10 000 kg/ha<sup>-1</sup> de nitrógeno. “Las formas orgánicas incluyen proteínas, aminoácidos y azúcares aminados”. Sin embargo, las formas químicas reconocidas representan sólo un 30 - 35 % del total del N orgánico del suelo. El resto, entre un 70 - 75 % del N orgánico, está en estructuras químicas complejas que aún no se han logrado identificar (Perdomo *et al.* sf).

El N es el principal elemento de mayor influencia en el crecimiento de los cultivos (Gallegos *et al.* 2000). El N forma parte de las “proteínas, clorofilas, alcaloides y enzimas” responsables de regular el crecimiento y formación del material vegetal (Valencia 1998 citado por Contreras 2009). Este elemento es absorbido por las plantas principalmente en forma de nitrato (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>) y en menor medida en amonio (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>). La absorción de nitrato y amonio cambia según la especie, variedad, temperatura, pH e intensidad luminosa como puede ser comprobado en diversos cultivos (Coraspe *et al.* 2009).

**Cuadro 7.** Niveles de materia orgánica y nitrógeno en el suelo.

Niveles	Contenido	
	Materia orgánica (%)	Nitrógeno (%)
Bajo	< 2	< 0.1
Medio	2 - 4	0.1 - 0.2
Alto	> 4	> 0.2

Fuente: Laboratorio de Análisis de Suelos, Agua y Ecotoxicología de la UNAS.

### c. Fósforo disponible

El fósforo se origina principalmente de la “meteorización de las rocas o minerales ricos en fósforo”, por lo que en algunos suelos se encontraran mayor contenido de este elemento, dependiendo del grado de presencia de las rocas fosfóricas. Por otro lado, la disponibilidad del fósforo para las plantas es muy restringida debido a que forma compuestos no absorbibles para las plantas. Los suelos con pH menores a 6.0 tiende a formar compuestos con el Fe, Al, Ca y Zn; y por encima de los 7.0, el ácido fosfórico forma compuestos especialmente con el Ca y Mg (Toledo 2016). El fósforo es asimilado por las plantas en forma de ácido fosfórico: fosfato di ácido ( $H_2PO_4^-$ ) y fosfato monoácido ( $HPO_4^{2-}$ ) (Valencia 1998 citado por Contreras 2009). Cabe señalar, que la absorción de fósforo es favorecida cuando hay buenos niveles de materia orgánica y de este elemento. Cuando se abona con escasez se aprovecha un menor porcentaje del fósforo que cuando se aplica con una dosis adecuada. Debido a su poca movilidad, es preciso enterrarlo cerca de las raíces para mayor aprovechamiento. Siendo el fósforo el principal elemento que interviene en el desarrollo radicular (Andrades y Martínez 2014).

**Cuadro 8.** Niveles de fósforo disponible en el suelo.

<b>Nivel</b>	<b>Contenido de fósforo disponible (ppm)</b>
Bajo	menor a 7
Medio	7 – 14
Alto	mayor a 14

Fuente: Laboratorio de Análisis de Suelos, Agua y Ecotoxicología de la UNAS.

#### **d. Potasio disponible**

La mayoría de los suelos son ricos en potasio de manera natural, debido a que poseen arcillas del tipo illita. Esto sucede cuando el material parental es pizarra. El potasio se halla en el suelo en forma de “catión intercambiable”, es decir, absorbido por las arcillas y la materia orgánica en sus sedes de intercambio, pasando fácilmente a la solución del suelo por la acción de los ácidos débiles (Garrido 1994). Este elemento es asimilado por las plantas como ion monovalente ( $K^+$ ). Por otro lado, se debe tener en cuenta que la asimilación del potasio por las plantas es afectada por la presencia de Ca y Mg en el suelo, ya que estos tres nutrientes compiten por lugares en los coloides (Toledo 2016).

**Cuadro 9.** Niveles de potasio disponible en el suelo.

<b>Nivel</b>	<b>Contenido de potasio disponible (ppm)</b>
Bajo	< 100
Medio	100 – 240
Alto	> 240

Fuente: Laboratorio de Análisis de Suelos, Agua y Ecotoxicología de la UNAS.

#### **e. Capacidad de intercambio catiónico (CIC)**

Es definida como la capacidad de un suelo para adsorber cationes ( $Ca^{+2}$ ,  $Mg^{+2}$ ,  $K^+$ ,  $Na^+$ ,  $H^+$  y  $Al^{+3}$ ) y es equivalente a la “carga negativa del

suelo”. Los cationes que son retenidos quedan protegidos contra los procesos de lixiviación (Jaramillo 2002). Cuando los valores del pH del suelo empiezan a incrementar se generan nuevas cargas negativas en el complejo de cambio (López *et al.* 2019). López *et al.* (2016) reportaron que el 32 % del comportamiento de la CIC es explicado por la acidez del suelo, los valores más bajos de la CIC se presentaron cuando el pH estuvo por debajo de 5.5 y más altos cuando el pH presentó valores entre 6 y 7; más la materia orgánica explicó un 14.5 %, con poca influencia de las arcillas por poseer una textura franco-arenosa. Según Intagri (2015), la materia orgánica posee una capacidad de 200 a 400 cmol(+)/kg, mientras que la arcilla posee una capacidad de 10 a 15 cmol(+)/kg, es decir una menor CIC.

#### **f. Calcio y magnesio cambiabile**

El carbonato de calcio ( $\text{CaCO}_3$ ) es el principal componente de la “piedra caliza”, se utiliza como material encalante y suministro de calcio (Ca) al suelo (Toledo 2016). Mientras que, el magnesio (Mg) principalmente se encuentra en las arcillas (clorita, illita, montmorillonita y vermiculita); generalmente la tasa de liberación de Mg por las arcillas es lenta (Mikkelsen 2010). Cuando los suelos presentan pH por debajo de 5.5, los cationes  $\text{Ca}^{+2}$  y  $\text{Mg}^{+2}$  son reemplazados por hidrógeno ( $\text{H}^+$ ) y el aluminio ( $\text{Al}^{+3}$ ) (cationes que transmiten propiedades ácidas al suelo), mientras que suelos con pH 6.5 - 7.0, la concentración de  $\text{Ca}^{+2}$  y  $\text{Mg}^{+2}$  incrementan (Rodríguez *et al.* 1993). Los materiales encalates más utilizados para neutralizar la acidez intercambiable son la cal agrícola ( $\text{CaCO}_3$ ) y la cal dolomita [ $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ ], favoreciendo el

incremento del pH y mejorando el suministro de Ca y Mg al suelo (Jaramillo 2002).

Según Sadeghian y Zapata (2012), existe una “correlación positiva” entre Ca y Mg; el Mg aumenta conforme a los incrementos de calcio. De acuerdo con el International Plant Nutrition Institute (2014) citado por López *et al.* (2016), los niveles críticos para Ca y Mg es de 0.5 y 0.2 meq/100 g y según Rena *et al.* (1986) citado por Rosas *et al.* (2008), el intervalo óptimo es de 3 a 4 Cmol/kg para Ca y 0.6 a 1.0 Cmol/kg.

#### **g. Aluminio intercambiable**

Más del 40 % de los suelos agrícolas en el mundo presentan problemas de acidez (Kochian 1995). El aluminio intercambiable ( $Al^{+3}$ ) es uno de los principales factores en el desarrollo de la acidez del suelo (Bernier y Alfaro 2006). La concentración de  $Al^{+3}$  incrementa cuando los suelos son ácidos (pH menores a 5.5) repercutiendo en la actividad de los microorganismos que intervienen en la mineralización de la M.O y la transformación de nitrógeno y azufre (Sadeghian 2016); además las altas concentraciones de aluminio en el suelo inhiben el crecimiento de las raíces, limitando la absorción de elementos esenciales (Ca, Mg, K y P) (Toledo 2016). López *et al.* (2016) observaron que la saturación de aluminio empieza a incrementar cuando la CIC se reduce por debajo de los 10 meq/100 g suelo, como consecuencia de que el Al es el “catión predominante” en el complejo de cambio. Sin embargo, la saturación de aluminio empieza a disminuir cuando el pH del suelo es mayor a 5.5, el aluminio se precipita como hidróxido insoluble (López *et al.* 2016).

El encalado es una de las estrategias más importantes para corregir problemas de toxicidad por  $\text{Al}^{+3}$  en los suelos ácidos (Rivera *et al.* 2016). El encalado incrementa el pH del suelo (Torella *et al.* 2007). El  $\text{Al}^{+3}$  e  $\text{H}^{+}$  desplazados por el  $\text{Ca}^{+2}$  reaccionan con el carbonato de la cal y el  $\text{H}_2\text{O}$  del suelo para formar hidróxido de aluminio precipitable,  $\text{CO}_2$  gaseoso y  $\text{H}_2\text{O}$  (Toledo 2016). Además, la aplicación de fuentes orgánicas al suelo ayuda a corregir la toxicidad por Al, por su capacidad para formar complejos estables aluminio-orgánicos que disminuyen la fitotoxicidad del elemento (Casierra y Aguilar 2007).

### **2.3.3. Propiedades biológicas del suelo**

El suelo hospeda organismos vivos dentro de las cuales la diversidad y la abundancia puede ser considerada un “indicador de la fertilidad del suelo”, siendo los macro y microorganismos los componentes importantes dentro de los ecosistemas. Estos organismos participan en la descomposición y reciclaje de la materia orgánica (Contreras y Adriazola 2011). A medida que digieren el alimento, descomponen la materia orgánica, la alteran estructural y químicamente y la liberan en forma de productos residuales (Smith y Smith 2007).

La macrofauna está compuesta principalmente por los detritívoros herbívoros, depredadores e ingenieros de suelo. El grupo funcional de los detritívoros vive en la hojarasca, son responsables de la trituración de los restos de animales y vegetales que componen la hojarasca, la fragmentación mecánica de estos restos favorece que haya mayor disponibilidad de alimentos para los invertebrados más pequeños y microorganismos (bacterias y hongos). La otra parte de los macroinvertebrados viven en el interior como en la superficie del

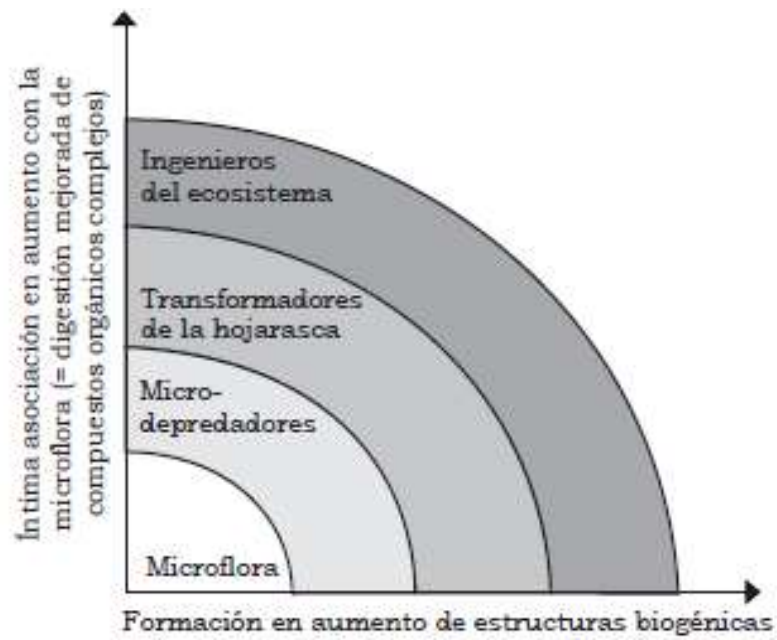
suelo. Los herbívoros se alimentan de las partes vivas de plantas y controlan la cantidad de material que ingresara al suelo, mientras que los depredadores consumen diversos invertebrados, por lo que alteran el equilibrio de las poblaciones y el balance de estas (Cabrera 2014).

Y, por último, los “ingenieros del suelo” o “ingenieros ecológicos”, este grupo está constituido por organismos que producen cambios físicos en el medio edáfico, son responsables de la formación de estructuras físicas con las cuales cambian la disponibilidad o accesibilidad de un recurso para otros organismos. Principalmente las hormigas, lombrices y termitas se distinguen por su capacidad de hacer agujeros en el suelo y originar una gran diversidad de estructuras órgano-minerales (deyecciones, nidos, montículos, macroporos, galerías y cámaras) (Jiménez *et al.* 2003).

En la Figura 2 se observa las relaciones de interacción entre los macro y microorganismos del suelo. A medida que aumenta el tamaño del organismo, sus relaciones con la microflora van desde la degradación hasta el mutualismo externo e interno; además, las estructuras biogénicas son cada vez más sólidas (Levalle 1997 citado por Jiménez *et al.* 2003).

Las poblaciones de macrofauna varían en el espacio y tiempo, disponibilidad de nutrientes, condiciones ambientales, especies vegetales y alteración del ecosistema (Usda 1999). Siendo favorecidas por el alto contenido de materia orgánica y pH neutro del suelo (Fernández *et al.* 2015). Por otro lado, es importante mencionar que la biodiversidad del suelo, el tamaño de las poblaciones de organismos en él y su actividad están influenciadas por las prácticas de manejo como laboreo, control fitosanitario y manejo de residuos de

cosecha, así como de la cobertura y de la fertilidad que tenga aquel (Jaramillo 2002; Cabrera 2012).



**Figura 2.** Relaciones de interacción entre los macro y microorganismos del suelo.

### III. MATERIALES Y MÉTODOS

#### 3.1. Lugar de ejecución

##### 3.1.1. Ubicación política y geográfica

El trabajo de investigación se llevó a cabo en áreas de influencia de productores de café del centro poblado de Nuevo San Miguel, distrito de Jepelacio, provincia de Moyobamba y departamento de San Martín. Con humedad relativa de 82 %, temperatura media anual entre 20 y 30°C y precipitación pluvial de 1 000 - 1 400 mm/anuales (Senamhi 2016).

**Cuadro 10.** Ubicación geográfica de cada tratamiento en estudio

Bloq.	Trat.	Variedad	Edad	Unidad fisiográfica	Pendiente (%)	Coordenadas		
						N	E	Altitud (msnm)
I	T1	Catimor	3 años	Colina alta	14	289210	9312953	1180
	T2	Catimor	4 años	Colina alta	18	289139	9312720	1156
	T3	Catimor	5 años	Colina alta	23	289243	9312647	1201
	T4	Caturra	3 años	Colina alta	19	289196	9312920	1178
	T5	Caturra	4 años	Colina alta	21	289194	9312785	1188
	T6	Caturra	5 años	Colina alta	18	289317	9312662	1216
II	T1	Catimor	3 años	Colina alta	18	289204	9312925	1178
	T2	Catimor	4 años	Colina alta	16	289156	9312724	1185
	T3	Catimor	5 años	Colina alta	21	289260	9312621	1220
	T4	Caturra	3 años	Colina alta	17	289197	9312935	1181
	T5	Caturra	4 años	Colina alta	11	289188	9312785	1197
	T6	Caturra	5 años	Colina alta	26	289286	9312671	1224
III	T1	Catimor	3 años	Colina alta	18	289204	9312905	1180
	T2	Catimor	4 años	Colina alta	16	289176	9312739	1201
	T3	Catimor	5 años	Colina alta	17	289313	9312620	1222
	T4	Caturra	3 años	Colina alta	20	289232	9312939	1190
	T5	Caturra	4 años	Colina alta	13	289151	9312765	1181
	T6	Caturra	5 años	Colina alta	21	289244	9312664	1221

### 3.2. Materiales y equipos

- Tubo muestreador
- Penetrómetro
- Vernier
- Wincha
- Pico
- Pala
- GPS (Sistema de Posicionamiento Global)
- Eclímetro
- Balanza digital
- Cámara fotográfica (Sony 15 MP)
- Cuaderno de apuntes

### 3.3. Metodología

#### 3.3.1. Características del campo experimental

La parcela experimental se caracteriza por ser de manejo orgánico, con aplicaciones frecuentes de compost, guano de isla y pulpa de café descompuesta. Con un sistema bajo sombra (45 %), con asociaciones de árboles forestales como capirona (*Calycophyllum spruceanum* Benth), cedro (*Cedrela odorata*), eucalipto (*Eucalipto* sp.), pino chuncho (*Schizolobium amazonicum* Huber ex Ducke) y guaba (*Inga edulis*). Las variedades de café evaluadas fueron Catimor y Caturra de 3, 4 y 5 años, bajo un sistema de siembra de 2 x 1 m, haciendo un total de 5 000 plantas/ha<sup>-1</sup>, en producción. El croquis de la parcela se encuentra en la Figura 41 del Anexo.

### 3.3.2. Diseño experimental y componentes en estudio

Se utilizó el diseño de bloques completamente al azar (DBCA) con 6 tratamientos y 3 repeticiones. Luego se aplicó la prueba de Duncan ( $\alpha=0.05$ ).

#### Componentes en estudio:

Variedades de café

- Catimor
- Caturra

#### Edad de la planta:

- 3 años
- 4 años
- 5 años

**Cuadro 11.** Descripción de los tratamientos en estudio.

Tratamientos	Descripción
T <sub>1</sub>	Catimor - 3 años
T <sub>2</sub>	Catimor - 4 años
T <sub>3</sub>	Catimor - 5 años
T <sub>4</sub>	Caturra - 3 años
T <sub>5</sub>	Caturra - 4 años
T <sub>6</sub>	Caturra - 5 años

#### Modelo aditivo lineal:

$$Y_{ij} = \mu + T_i + \beta_j + E_{ij}$$

Dónde:

$Y_{ij}$  = respuesta obtenida en la j - ésima repetición a la cual se le aplicó el

i – ésimo tratamiento.

$\mu$  = efecto de la media general.

$T_i$  = efecto del  $i$  – ésimo tratamiento.

$\beta_j$  = efecto del  $j$  – ésimo bloque.

$E_{ij}$  = efecto aleatorio del error experimental asociado a la observación  $Y_{ij}$

Para:

$i = 1, 2, 3, 4, 5, 6$  tratamientos

$j = 1, 2, 3$  repeticiones

**Cuadro 12.** Esquema del análisis de variancia (ANVA).

Fuentes de variación	Fórmula	Grados de Libertad
Bloques	$r - 1$	2
Tratamientos	$t - 1$	5
Error experimental	$(r - 1) (t - 1)$	10
<b>Total</b>	$(r \times t) - 1$	17

### 3.4. Parámetros de evaluación

#### 3.4.1. Propiedades físicas del suelo

**Cuadro 13.** Parámetros físicos del suelo

Indicadores físicos	Método
Textura del suelo	Método del hidrómetro de Bouyucos
Densidad aparente	Método del cilindro
Porosidad	Densidad aparente, densidad real
Resistencia a la penetración	Método directo (Penetrómetro)

Fuente: Laboratorio de Análisis de Suelos, Agua y Ecotoxicología de la UNAS

#### a. Densidad aparente

Se siguió método del cilindro propuesto por Jaramillo (2002), donde se determinó la masa de un volumen de suelo, extraído con cilindros de 7 cm de altura y con radio de 2.45 cm. La evaluación consistió en lo siguiente:

- Se ubicó el campo a muestrear y se limpió dicha superficie.
- Luego se colocó el cilindro con sus bordes cortantes hacia el suelo, colocando un trozo de madera sobre él.
- Con el martillo se golpeó la madera sobre la zona donde se halló el cilindro, hasta que este penetre completamente en el suelo.
- Con una pala de jardinero se retirará la tierra de alrededor del cilindro hasta el nivel bajo de la base inferior de este.
- Con un cuchillo, se cortó la tierra de alrededor del cilindro.
- Luego se colocó las tapas y se llevó al laboratorio.
- Se colocó el suelo en un platillo de aluminio y se llevó a estufa a 105°C durante 24 horas.
- Y por último se pesó el suelo y se realizó los cálculos respectivos a partir de la siguiente fórmula:

$$Da = \frac{P_{ss}}{V_c}$$

Dónde:

Da: densidad aparente: g/cm<sup>3</sup>.

Pss: Peso del suelo seco en el horno.

Vc: Volumen del cilindro.

#### **b. Porosidad total**

La porosidad total depende de las características de la fracción sólida del suelo, es estimada en base a la densidad aparente y real. El cálculo se realizó a partir de la siguiente fórmula.

$$p = \left[ 1 - \frac{D_a}{D_r} \right]$$

Donde:

$p$ : Porosidad total.

$D_a$ : Densidad aparente.

$D_r$ : Densidad real (2.65 g/ cm<sup>3</sup> como media general)

### c. Resistencia a la penetración

Para determinar la resistencia del suelo a la penetración se utilizó el penetrómetro. La evaluación consistió en limpiar la superficie del suelo, luego se colocó en cero el anillo de calibración del instrumento, colocando verticalmente sobre el suelo, luego se presionó con los dedos suave y uniformemente para que no se produzca una compresión en el suelo, se anotó la lectura de la fuerza aplicada en kg/cm<sup>2</sup>. La lectura se realizó en la superficie del suelo de la planta de café.

#### 3.4.2. Propiedades químicas del suelo

Con la finalidad de determinar la fertilidad natural del suelo, se realizó el muestreo de suelo de cada tratamiento y repetición, mediante un tubo muestreador. Se tomó la muestra a los 60 cm del cuello de la planta y a una profundidad de 30 cm, en los cuatro puntos cardinales de la planta. De cada punto cardinal se obtuvieron dos submuestras haciendo un total de ocho submuestras por unidad experimental; se mezclaron homogéneamente las submuestras para obtener una sola muestra representativa de aproximadamente de 1 kg. En total se tomaron 18 muestras, los cuales fueron enviadas al Laboratorio de Análisis de Suelos, Agua y Ecotoxicología de la UNAS para la evaluación de los parámetros químicos del suelo.

**Cuadro 14.** Parámetros químicos del suelo

<b>Parámetros químicos</b>	<b>Método empleado</b>
pH (1:1)	: Potenciómetro, relación suelo agua 1:1
Materia orgánica (%)	: Walkley y Black
Nitrógeno (%)	: % M.O x 0.05
Fósforo disponible (ppm)	: Olsen modificado
Potasio disponible (ppm)	: Desplazamiento con Acetato de Amonio 1N pH: 7.0
Para suelos con pH>5.5: cationes cambiables (Ca <sup>+2</sup> , Mg <sup>+2</sup> , Na <sup>+</sup> , K <sup>+</sup> )	: Reemplazamiento con acetato de amonio 1N pH: 7.0 (cuantificado por EAA).
Para suelos con pH < 5.5: cationes cambiables (Ca <sup>+2</sup> , Mg <sup>+2</sup> , Al <sup>+3</sup> , H <sup>+</sup> ),	: Reemplazamiento con Cloruro de Potasio 1N: cuantificado el Ca <sup>+2</sup> , Mg <sup>+2</sup> por EAA, y método de Yuan para Al <sup>+3</sup> , H <sup>+</sup> .
CIC	: Suma de cationes (Ca <sup>+2</sup> , Mg <sup>+2</sup> , Na <sup>+</sup> , K <sup>+</sup> )
CICe	: Suma de cationes (Ca <sup>+2</sup> , Mg <sup>+2</sup> , Al <sup>+3</sup> , H <sup>+</sup> )

Fuente: Laboratorio de Análisis de Suelos, Agua y Ecotoxicología de la UNAS

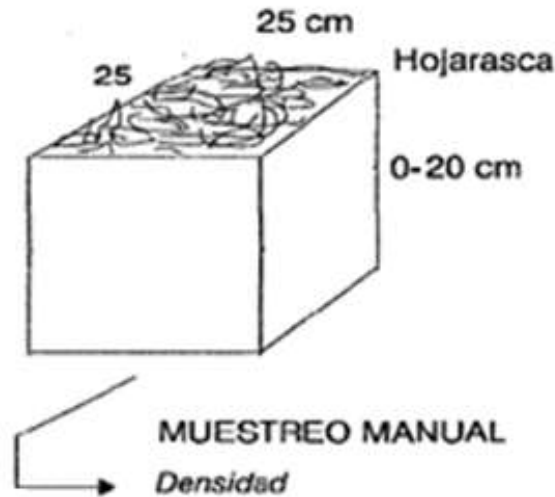
### **3.4.3. Parámetros biológicos del suelo**

#### **a. Muestreo de la macrofauna del suelo**

Para el muestreo de la macrofauna del suelo se utilizó la metodología propuesta por el “Programa Tropical Soil Biology and Fertility (TSBF)” (CIAT/TSBF-LAC, 2015), siendo modificado por el trabajo de investigación. El muestreo se realizó colocando un monolito de (25 x 25 x 5 cm) dentro del área de la proyección de la copa del cafeto. Se realizó la limpieza de la hojarasca, seguidamente se tomó la muestra de 0 - 20 cm de profundidad del suelo. Las muestras fueron colocadas en bolsas de polietileno con sus respectivos códigos para la evaluación en el laboratorio.

Los organismos fueron separados con ayuda de una pinza sobre bandejas de plástico y luego colocados en un recipiente hermético de

vidrio con alcohol (75 %). Para la identificación a nivel de orden según la clasificación taxonómica se utilizaron manuales, libros e internet.



**Figura 3.** Monolito de 25 x 25 x 20 cm.

#### A.1. Índice de diversidad de Shannon-Wiener (H')

El índice mide la heterogeneidad de una comunidad sobre la base de dos factores: “Número de especies presentes y su abundancia relativa” (PLA, 2006). Para determinar el índice se utilizó la siguiente formula:

Formula de Shannon-Wiener:

$$H' = - \sum_{i=1}^S p_i \ln p_i$$

$$p_i = \frac{n_i}{N}$$

Dónde:

$n_i$ : número de individuos en el sistema de la especie determinada  $i$ .

$N$ : número total de individuos

$S$ : número total de especies

#### **3.4.4. Evaluación de las características biométricas del cafeto**

La evaluación se realizó en el mes de agosto del 2017, el cual consistió en medir y cuantificar las características biométricas del cafeto.

##### **a. Altura de planta**

Para determinar la altura de planta se utilizó una wincha, se midió desde el nivel del suelo o cuello de planta hasta la yema apical del tallo dominante.

##### **b. Número de ramas**

Se contó el número de ramas desarrolladas en cada planta.

##### **c. Longitud de la rama más grande de la planta**

La longitud de rama se determinó midiendo con una wincha, la rama que inicia desde el tallo principal hasta la parte final de la rama.

##### **d. Diámetro del tallo**

Se midió sobre el cuello de la raíz y al ras del suelo, para ello se utilizó un vernier digital.

##### **e. Proyección de la copa del café**

Se tomó como diámetro medio de copa la suma de los diámetros de copa dentro de la fila y hacia las calles divididas entre dos (Figura 32 del Anexo). Mediante la siguiente formula se determinó el área proyectada por la copa:

$$\text{Área de proyección de copa del café (m}^2\text{)} = \frac{\pi D^2}{4}$$

Dónde:

D: diámetro medio de la copa.

$\pi$ : 3.1416 constante.

#### f. Sistema radicular

**Profundidad radicular:** Para evaluar la profundidad radicular del cafeto se adoptó la metodología propuesta por Juan (1970). Se estudió un área de 1.5 m<sup>2</sup>, en el cual se hizo la excavación, extrayendo cuidadosamente la tierra sin maltratar las raíces por cada horizonte, se identificó las raíces primarias, secundarias y terciarias hasta encontrar la profundidad máxima alcanzada por cada raíz (Figura 28 del Anexo).

**Área radicular:** Como las raíces son un sistema deformable, para tomar las medidas y determinar la distribución radicular de cada planta del café se usó la metodología propuesta por Box (1996). Para poder observar y cuantificar el crecimiento de raíces fueron extraídas y lavadas (eliminación de impurezas), luego colocadas en un sistema de plano cartesiano dibujado sobre una lámina de polietileno color blanco con medidas de 1 m de alto por 1.30 m de ancho. Las dimensiones de las cuadrículas fueron dibujadas en una escala real de 1:1, luego fueron superpuestas las raíces para tomar las imágenes con una cámara digital Profesional Reflex Nikon D3500 C/18-55 Y 70-300, las imágenes fueron capturas en alta resolución como se aprecia en la (Figura 30 del Anexo) para después ser digitalizadas y llevadas a un programa para el área radicular plana que ocupa cada raíz en el suelo.

Cada imagen de la raíz fue capturada del mismo modo, luego fueron digitalizadas a escala 1:1, después almacenadas en archivos digitales de imagen tipo jpg, una vez almacenadas todas las imágenes con la ayuda del software AutoCAD 2018 - versión española se inició el proceso de delimitación

de los bordes de cada raíz ya digitalizadas previamente a una escala de 1:1 para determinar el área plana de cada raíz como se aprecia en la (Figura 31 del Anexo).

Una vez encontrada el área de cada raíz, medimos las longitudes de cada raíz, su diámetro y radio; para determinar el área total ocupada por cada raíz utilizando la fórmula del área del cilindro.

**Área Lateral:**  $A_L = 2 \cdot \pi \cdot r \cdot h$

Dónde:

$\pi = 3.1416$  constante

r = radio del cilindro

h = la altura del cilindro

**Área de la base:**  $A_b = \pi r^2$

**Área Total:**  $A_T = A_L + 2 \cdot A_b = 2\pi rh + 2(\pi r^2)$

### 3.4.5. Análisis de la concentración de elementos en las hojas y raíces del café

**Para las hojas:** Se recolectó las muestras de la cuarta hoja de la nueva rama de café, después de la cosecha.

**Para las raíces:** La profundidad de estudio fue de 100 centímetros, donde se tomaron las raíces y luego fueron lavadas para eliminar las impurezas.

Las muestras fueron enviadas al Laboratorio de Análisis de Suelos, Agua y Ecotoxicología de la UNAS para determinar concentración de elementos en la hoja y raíz del café.

#### **3.4.6. Estimación del rendimiento del café**

Para obtener los datos de producción, se registró y pesó en gramos la cantidad total de café cerezo de cada planta producida durante la campaña 2017. Los frutos fueron cosechados en su “madurez fisiológica” y el peso se determinó en una balanza de precisión.

El peso de granos pergamino por planta se determinó utilizando el factor promedio de conversión; por cada 250 kg de café cereza se obtiene 55.2 kg de café pergamino seco con 12 % de humedad. Para obtener el rendimiento en qq/ha se multiplicó el rendimiento de cada planta (kg/planta) por el número total de plantas por hectárea ( $5\ 000/\text{ha}^{-1}$ ), luego se dividió entre 45 (Conversión para quintal).

#### **3.4.7. Análisis correlacional**

Para determinar la relación de las propiedades edáficas y la distribución radicular en la producción del cultivo de café (*Coffea arabica* L.), se utilizó el programa libre SPSS21 Statistics, con la finalidad de encontrar el mejor modelo matemático que explique las relaciones entre las variables.

## **IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

### **4.1. Propiedades físicas del suelo**

En el Cuadro 30 del Anexo, se muestra el análisis de varianza de las propiedades físicas del suelo, donde se observa que no mostraron diferencias estadísticas significativas en la fuente de variación de bloques para ninguna de las propiedades, sin embargo, a nivel de tratamientos presentaron alta significancia estadística para la densidad aparente, porosidad total e índice de penetrabilidad, mas solo significancia estadística para limo y arcilla; arena no presentó significancia estadística. Con coeficientes de variación de 30.89, 14.34, 18.18, 3.21, 3.12 y 11.16 % para arena, limo, arcilla, densidad aparente, porosidad total e índice de penetrabilidad respectivamente.

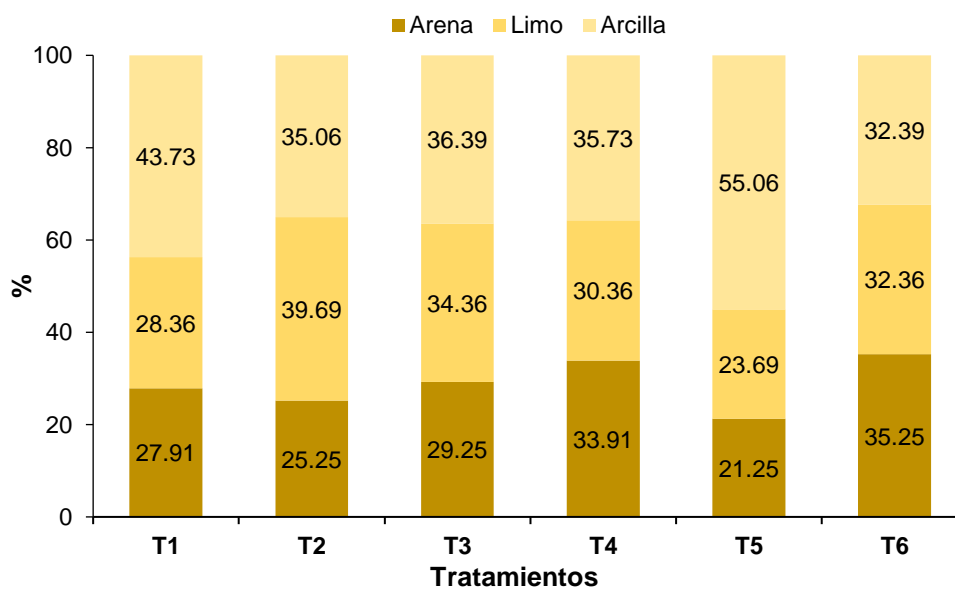
#### **4.1.1. Porcentajes de arena, limo y arcilla**

En el Cuadro 15 y Figura 4, se presenta la comparación de medias de la prueba de Duncan ( $\alpha = 0.05$ ) para los porcentajes de arena, limo y arcilla del suelo; referente al porcentaje de arena los tratamientos no evidenciaron diferencias estadísticas significativas, sin embargo, los porcentajes de limo y arcilla si presentaron diferencias estadísticas significativas; el porcentaje más alto de limo se registró en el tratamiento T<sub>2</sub> (Catimor - 4 años) con 39.69 % y el mínimo en el tratamiento T<sub>5</sub> (Caturra - 4 años) con 23.69 %, mientras que el porcentaje más alto de arcilla se registró en el tratamiento T<sub>5</sub> (Caturra - 4 años) con 55.06 % y el mínimo en el tratamiento T<sub>6</sub> (Caturra - 5 años) con 32.39 %.

**Cuadro 15.** Prueba de Duncan ( $\alpha = 0.05$ ) de los tratamientos para los porcentajes de arena, limo y arcilla del suelo.

Arena %			Limo %			Arcilla %		
Trat.	Prom.	Sig.	Trat.	Prom.	Sig.	Trat.	Prom.	Sig.
T <sub>6</sub>	35.25	a	T <sub>2</sub>	39.69	a	T <sub>5</sub>	55.06	a
T <sub>4</sub>	33.91	a	T <sub>3</sub>	34.36	a b	T <sub>1</sub>	43.73	a b
T <sub>3</sub>	29.25	a	T <sub>6</sub>	32.36	a b c	T <sub>3</sub>	36.39	b
T <sub>1</sub>	27.91	a	T <sub>4</sub>	30.36	b c	T <sub>4</sub>	35.73	b
T <sub>2</sub>	25.25	a	T <sub>1</sub>	28.36	b c	T <sub>2</sub>	35.06	b
T <sub>5</sub>	21.25	a	T <sub>5</sub>	23.69	c	T <sub>6</sub>	32.39	b

T<sub>1</sub>: Catimor - 3 años; T<sub>2</sub>: Catimor - 4 años; T<sub>3</sub>: Catimor - 5 años; T<sub>4</sub>: Caturra - 3 años; T<sub>5</sub>: Caturra - 4 años; T<sub>6</sub>: Caturra - 5 años. Tratamientos unidos por la misma letra en la columna no existe significancia estadística.



T<sub>1</sub> Catimor - 3 años T<sub>2</sub> Catimor - 4 años T<sub>3</sub> Catimor - 5 años  
T<sub>4</sub> Caturra - 3 años T<sub>5</sub> Caturra - 4 años T<sub>6</sub> Caturra - 5 años

**Figura 4.** Porcentajes de arena, limo y arcilla del suelo.

El suelo es un “recurso natural” cuyas características varían en el espacio y en el tiempo, está estrictamente relacionado con la roca madre, el clima y el manejo, es por ello por lo que se encuentra una gran diversidad de unidades de suelo en una misma localidad (Sánchez 2015). Para el

establecimiento del cultivo de café, los productores siembran en sitios donde piensan que el suelo es mejor, independientemente de la textura que presenta (George 2006). Con respecto a lo mencionado, podemos decir que el cultivo de café se puede establecer en una gran diversidad de suelos. Por ejemplo, Contreras (2009) halló en los suelos cafetaleros del distrito de Villa Rica-Oxapampa una proporción de 38, 47 y 15 % de arena, limo y arcilla, predominando la textura franco; López *et al.* (2016) encontraron que las fracciones granulométricas de los suelos cafetaleros de la reserva de Biosfera El Triunfo-Chiapas estuvieron representados por 43.04, 28.60 y 28.37 % de arena, limo y arcilla; Márquez *et al.* (2016) reportaron que los suelos de las fincas cafetaleras en la provincia de La convención-Cuzco presentaron textura franco-arcilloso; Vilchez *et al.* (2019) analizaron los suelos cafetaleros de la cuenca de Chinchipe, donde los promedios de arena, limo y arcilla alcanzaron 33.95, 33.67 y 32.38 %, predominado suelos tipo franco.

En la Figura 34 y 35 del Anexo, podemos observar que la mayoría de los suelos fueron de textura arcillosa, franco-arcillosa y en menor cantidad suelos de textura franco. Según Andrades y Martínez (2014), los suelos arcillosos retienen gran cantidad de agua y nutrientes por su elevada capacidad de intercambio catiónico. Sin embargo, Bernal *et al.* (2015) mencionan que los suelos de textura arcillosa poseen un drenaje más deficiente que los de textura limosa o arenosa.

#### **4.1.2. Densidad aparente y porosidad total**

En el Cuadro 15, se presenta la comparación de medias de la prueba de Duncan ( $\alpha = 0.05$ ) de los tratamientos para la densidad aparente (DA)

del suelo, donde se muestra que los tratamientos T<sub>2</sub> (Catimor - 4 años), T<sub>4</sub> (Caturra - 3 años), T<sub>3</sub> (Catimor - 5 años) y T<sub>6</sub> (Caturra - 5 años) obtuvieron los mayores promedios de DA con 1.37, 1.36, 1.35 y 1.34 g/cm<sup>3</sup>, mas no presentaron diferencias estadísticas significativas entre ellos, pero si con los tratamientos T<sub>1</sub> (Catimor - 3 años) y T<sub>5</sub> (Caturra - 4 años), quienes evidenciaron los promedios más bajos con 1.23 y 1.19 g/cm<sup>3</sup>, pero sin diferenciarse estadísticamente entre ambos; con respecto a la porosidad total los tratamientos T<sub>5</sub> (Caturra - 4 años) y T<sub>1</sub> (Catimor - 3 años) con 55.26 y 53.54 % fueron numérica y estadísticamente superiores a los demás tratamientos, mas no mostraron diferencias estadísticas significativas entre ambos.

**Cuadro 16.** Prueba de Duncan ( $\alpha = 0.05$ ) de los tratamientos para la densidad aparente y porosidad total del suelo.

Densidad aparente (g/cm <sup>3</sup> )			Porosidad total (%)		
Trat.	Promedio	Sig.	Trat.	Promedio	Sig.
T <sub>2</sub>	1.37	a	T <sub>5</sub>	55.26	a
T <sub>4</sub>	1.36	a	T <sub>1</sub>	53.54	a
T <sub>3</sub>	1.35	a	T <sub>6</sub>	49.61	b
T <sub>6</sub>	1.34	a	T <sub>3</sub>	49.18	b
T <sub>1</sub>	1.23	b	T <sub>4</sub>	48.60	b
T <sub>5</sub>	1.19	b	T <sub>2</sub>	48.38	b

T<sub>1</sub>: Catimor - 3 años; T<sub>2</sub>: Catimor - 4 años; T<sub>3</sub>: Catimor - 5 años; T<sub>4</sub>: Caturra - 3 años; T<sub>5</sub>: Caturra - 4 años; T<sub>6</sub>: Caturra - 5 años. Tratamientos unidos por la misma letra en la columna no existe significancia estadística.

Los tratamientos evidenciaron valores de DA entre 1.19 - 1.37 g/cm<sup>3</sup>, debido a que los suelos son de característica arcillosa (Cuadro 7). Según el Usda (1999), los suelos arcillosos frecuentemente evidencian valores de DA entre 1.1 - 1.3 g/cm<sup>3</sup>. También la materia orgánica (M.O) influye en los valores de la DA, Salamanca y Sadeghian (2005) indican que a medida que incrementan

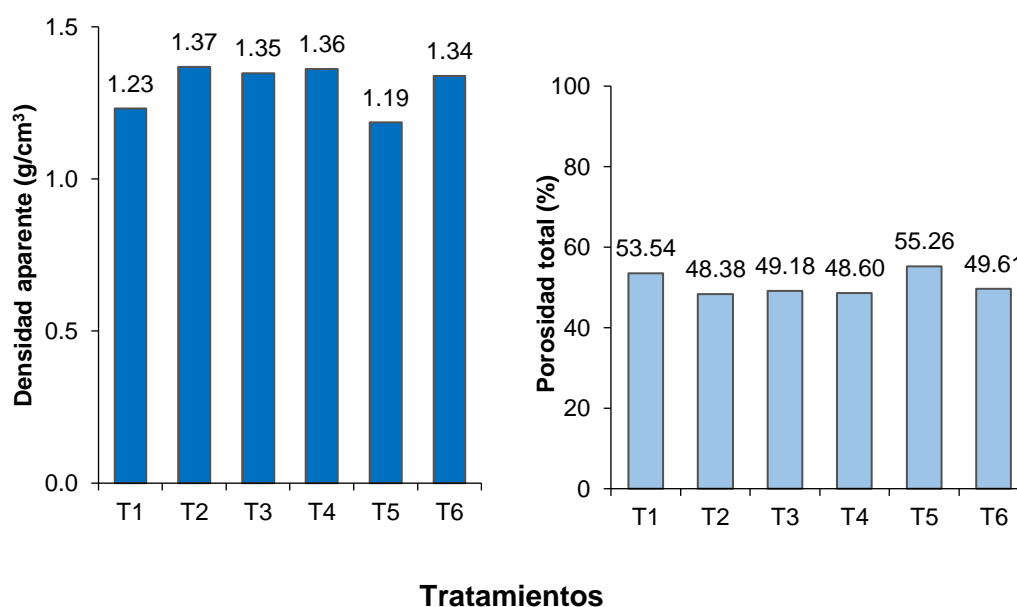
los contenidos de M.O (correspondientes a los residuos que aportan los árboles de sombra y de la misma planta de café en forma de hojarasca) disminuyen los valores de la DA y retienen mayor cantidad de agua disponible para los cultivos. Además, González *et al.* (2012) señalan cuando la superficie del suelo es semidesnuda se reduce el contenido de M.O, por lo tanto, se incrementa el valor de la DA hasta  $1.80 \text{ g/cm}^3$ .

Los valores de la porosidad total registrados en todos los tratamientos son considerados altos ( $> 40 \%$ ) de acuerdo con la Fao (2009), sin embargo, Flores y Alcalá (2010) indican que a partir del  $60 \%$  los suelos son considerados altamente porosos; principalmente los tratamientos  $T_5$  (Caturra - 4 años) y  $T_1$  (Catimor - 3 años) ostentaron los valores más altos por ser de característica arcillosa (Cuadro, 15), Flores y Alcalá (2010) señalan que los suelos arcillosos poseen gran cantidad de microporos; además estos valores fueron influenciados por el contenido de M.O. Julca *et al.* (2006) mencionan que la M.O forma agregados y da estabilidad estructural, uniendo las arcillas y formando complejo de cambio, favoreciendo la penetración del agua y su retención. Valores similares fueron reportados por Paz *et al.* (2006), quienes hallaron en los suelos de los cafetales bajo sombra una excelente porosidad con  $66.1 \%$ , de manera que no encontraron limitantes de carácter físico para el establecimiento del cultivo de café; Luna *et al.* (2012) indican que los sistemas manejados orgánicamente la porosidad es alta con valores hasta  $65 \%$ .

González *et al.* (2012) mencionan que la macroporosidad del suelo está asociada también con la masa radicular de las plantas herbáceas que penetran la superficie del suelo y propician una buena aireación y circulación del agua en el suelo. Además, Shaxson y Barber (2005) citados por Rodríguez *et al.* (2016) indican

que las raíces de los árboles forestales y de la misma planta de café, actúan como “subsoladores biológicos” que penetran los diferentes horizontes, formando canales más estables que los generados por medios mecánicos, las raíces liberan “sustancias orgánicas” que estabilizan la superficie de estos, una vez que las raíces han muerto y se han contraído, dichos poros serán lo suficientemente grandes y estables como para facilitar el movimiento de agua a través de las capas del suelo.

Es importante mencionar, cuando hay una reducción en la porosidad del suelo, las propiedades físicas son afectadas negativamente, provocando menor capacidad de infiltración del agua, menor aireación del suelo y obstaculización de la penetración de las raíces en el suelo (Orozco *et al.* 2016).



T<sub>1</sub> Catimor - 3 años T<sub>2</sub> Catimor - 4 años T<sub>3</sub> Catimor - 5 años  
 T<sub>4</sub> Caturra - 3 años T<sub>5</sub> Caturra - 4 años T<sub>6</sub> Caturra - 5 años

**Figura 5.** Densidad aparente y porosidad total del suelo.

### 4.1.3. Resistencia a la penetración

En el Cuadro 17, se presenta la prueba de Duncan ( $\alpha = 0.05$ ) de los tratamientos para la resistencia del suelo a la penetración, donde se observa que el tratamiento T<sub>2</sub> (Catimor - 4 años) obtuvo el mayor promedio con 0.71 kg/cm<sup>2</sup>, sin diferenciarse estadísticamente del tratamiento T<sub>5</sub> (Caturra - 4 años) con 0.64 kg/cm<sup>2</sup>, pero este último fue similar estadísticamente al tratamiento T<sub>3</sub> (Catimor - 5 años) con 0.55 kg/cm<sup>2</sup>, asimismo el tratamiento T<sub>3</sub> (Catimor - 5 años) fue similar estadísticamente a los tratamientos T<sub>6</sub> (Caturra - 5 años), T<sub>4</sub> (Caturra - 3 años) y T<sub>1</sub> (Catimor - 3 años) quienes presentaron los menores valores con 0.51, 0.45 y 0.44 kg/cm<sup>2</sup>.

**Cuadro 17.** Prueba de Duncan ( $\alpha = 0.05$ ) de los tratamientos para la resistencia del suelo a la penetración.

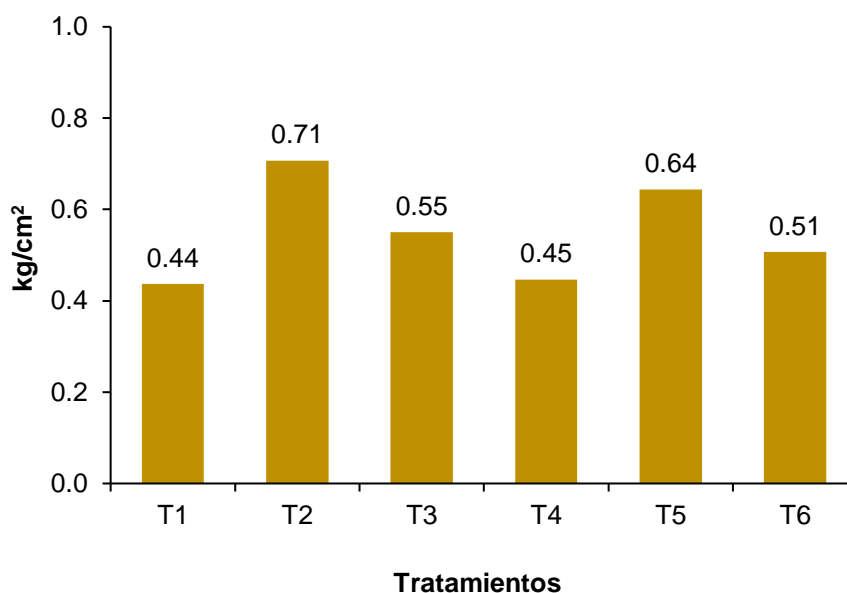
Resistencia a la penetración kg/cm <sup>2</sup>			
Tratamientos	Descripción	Promedio	Sig.
T <sub>2</sub>	Catimor - 4 años	0.71	a
T <sub>5</sub>	Caturra - 4 años	0.64	a b
T <sub>3</sub>	Catimor - 5 años	0.55	b c
T <sub>6</sub>	Caturra - 5 años	0.51	c
T <sub>4</sub>	Caturra - 3 años	0.45	c
T <sub>1</sub>	Catimor - 3 años	0.44	c

Tratamientos unidos por la misma letra en la columna no existe significancia estadística.

Pese a mostrar diferencias estadísticas significativas entre los tratamientos, según el Ict (2004) citado por Quispe (2013), todos los suelos que presentan valores inferiores a 1 kg/cm<sup>2</sup> son considerados suelos muy suaves. Estos valores se justifican por el contenido de M.O, que se encuentra en mayor abundancia a los 10 primeros centímetros del suelo (Cardona y Sadeghian

2005b). Por las características arcillosas de los suelos estudiados podríamos decir que la compactación del suelo debería ser más acentuada, pero por ser de manejo orgánico hay una declinación. El contenido de M.O será mayor en los primeros centímetros del suelo, por lo tanto, el suelo estará expuesto a una mejora constante de las propiedades físicas, así lo evidenció Salamanca y Sadeghian (2005), quienes señalan que el incremento de la M.O en el suelo disminuye la resistencia a la penetración y mejoran la retención de humedad en el suelo: La interacción de estas tres propiedades es la que mayor influye en las condiciones que determinan la disponibilidad de agua y aire y el área a ser explorada por el sistema radicular. Así también Cardona y Sadeghian (2005b) reportaron que los cafetales bajo sombra el índice de penetrabilidad en la primera capa del suelo es bajo, mientras que en los cafetales a plena exposición solar encontraron valores altos. Además, Quispe (2013) señala que el sistema de manejo que se le otorga al suelo influye significativamente en los valores de la resistencia del suelo a la penetración, en un sistema de manejo mejorado, a los 10 cm de profundidad del suelo halló  $1.46 \text{ kg/cm}^2$ , mientras que en el sistema de manejo tecnificado determinó  $1.84 \text{ kg/cm}^2$ .

Ferreras *et al.* (2007) determinaron que los suelos que evidencian pérdida de carbono y la estabilidad estructural son susceptibles a incrementar la resistencia a la penetración en los suelos subtropicales, y los suelos que presentan mejores características de estructuración y menor compactación muestran mejor comportamiento frente a factores de degradación.



**T1** Catimor - 3 años    **T2** Catimor - 4 años    **T3** Catimor - 5 años  
**T4** Caturra - 3 años    **T5** Caturra - 4 años    **T6** Caturra - 5 años

**Figura 6.** Resistencia del suelo a la penetración.

#### 4.2. Propiedades químicas del suelo

En el Cuadro 23 del Anexo, se muestra el análisis de varianza de las propiedades químicas, donde se observa que a nivel de bloques no se encontraron diferencias estadísticas significativas para ninguna de las variables dependientes, mientras que a nivel de tratamientos si presentaron alta significancia estadística para pH, materia orgánica, nitrógeno, calcio, magnesio y saturación de aluminio; solo significancia estadística en potasio disponible, sin embargo, fósforo disponible y la CIC no presentaron significancia estadística. Los coeficientes de variación fueron los siguientes: para el pH de 5.24 %, la materia orgánica y nitrógeno de 6.59 %, el fósforo disponible de 66.83 %, el potasio disponible de 21.73 %, la CIC de 27.81 %, el calcio de 10.91 %, el magnesio de 21.14 % y la saturación de aluminio de 20.90 %.

#### 4.2.1. pH

En el Cuadro 18, se presenta la comparación de medias de la prueba de Duncan ( $\alpha = 0.05$ ) para el pH del suelo, donde se observa que los tratamientos T<sub>5</sub> (Caturra - 4 años) y T<sub>2</sub> (Catimor - 4 años) obtuvieron los mayores promedios de pH con 6.10 y 5.82, no diferenciándose entre sí, pero siendo superiores a los demás tratamientos, mientras que el tratamiento T<sub>6</sub> (Caturra - 5 años) obtuvo el menor pH con 4.72.

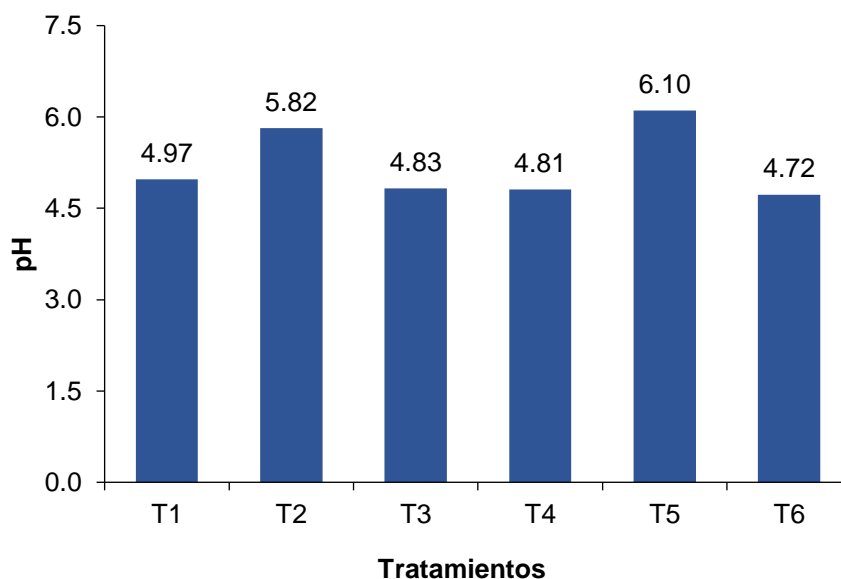
**Cuadro 18.** Prueba de Duncan ( $\alpha = 0.05$ ) de los tratamientos para el pH del suelo.

Tratamientos	Descripción	pH	
		Promedio	Sig.
T <sub>5</sub>	Caturra - 4 años	6.10	a
T <sub>2</sub>	Catimor - 4 años	5.82	a
T <sub>1</sub>	Catimor - 3 años	4.97	b
T <sub>3</sub>	Catimor - 5 años	4.83	b
T <sub>4</sub>	Caturra - 3 años	4.81	b
T <sub>6</sub>	Caturra - 5 años	4.72	b

Tratamientos unidos por la misma letra en la columna no existe significancia estadística.

Sánchez (2015) menciona que el pH adecuado para el cultivo de café en el Perú se encuentra en el rango de 4.5 - 5.5, mientras que Sadeghian (2016) considera un rango de pH más limitado a partir de 5.0 - 5.5, respecto a ello podemos decir que los suelos estudiados son adecuados para el establecimiento del cultivo de café. Resultados similares fueron hallados por Rosas *et al.* (2008), quienes encontraron en suelos cafetaleros de México valores de pH que varían desde 4.7 hasta 5.0; Núñez *et al.* (2011) encontraron en las fincas cafetaleras de República Dominicana valores de pH entre 4.61 y 7.69 para

los cafetales de la variedad Caturra y Típica; Noriega *et al.* (2014) reportan valores medios de pH con 5.44, influenciado por la precipitación pluvial que determina la meteorización de los minerales y descomposición de la materia orgánica. Similarmente es en estos suelos el pH obedece a la meteorización de los minerales; sin embargo, en esta zona es menos intenso debido a la menor precipitación de 1 000 - 1 400 mm/anual; consecuentemente implica: modificación de los minerales secundarios, disminución de la CIC, e incremento de otros elementos como el Al, Mn y Fe., con el lavado de bases cambiables por la lluvia y su reemplazo con los cationes de carácter ácido. Además de la descomposición de la materia orgánica y nitrificación observados en los tratamientos T<sub>1</sub> (Catimor - 3 años), T<sub>3</sub> (Catimor - 5 años), T<sub>4</sub> (Caturra - 3 años) y T<sub>6</sub> (Caturra - 5 años) que poseen valores medios de materia orgánica y nitrógeno (Cuadro 11), por otra parte, es necesario mencionar que estos suelos no han recibido la aplicación de encalates para incrementar el pH del suelo.



T<sub>1</sub> Catimor - 3 años T<sub>2</sub> Catimor - 4 años T<sub>3</sub> Catimor - 5 años  
 T<sub>4</sub> Caturra - 3 años T<sub>5</sub> Caturra - 4 años T<sub>6</sub> Caturra - 5 años

**Figura 7.** Reacción del suelo (pH).

#### 4.2.2. Materia orgánica y nitrógeno

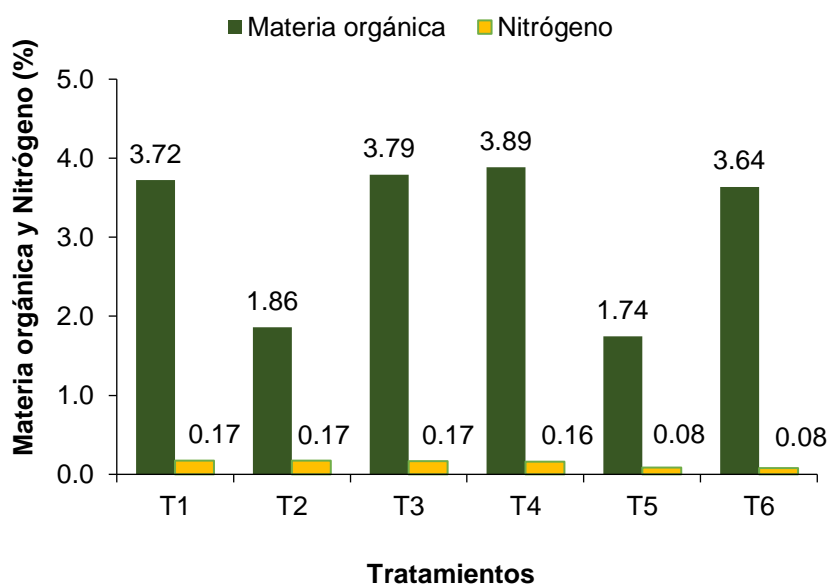
En el Cuadro 19, se presenta la prueba de Duncan ( $\alpha = 0.05$ ) de los tratamientos para la materia orgánica y el nitrógeno del suelo, donde se observa que mostraron diferencias estadísticas significativas, siendo los mejores tratamientos el T<sub>4</sub> (Caturra - 3 años), T<sub>3</sub> (Catimor - 5 años), T<sub>1</sub> (Catimor - 3 años) y T<sub>6</sub> (Caturra - 5 años) con 3.89, 3.79, 3.72 y 3.64 % de materia orgánica y 0.17, 0.17, 0.17 y 0.16 % de nitrógeno, pero sin diferenciarse estadísticamente entre ellos. Los valores medios de materia orgánica se atribuyen a los aportes de hojarasca de los árboles de sombra, así como también del cafeto y los residuos de las plantas arvenses. Cardona y Sadeghian (2005a) indican que existe un aporte de material orgánico equivalente a 11 t/ha/año en cafetales con sombra de *Inga* spp, lo que contribuye a la formación de materia orgánica estable del suelo. También Farfán y Urrego (2007), en un estudio realizado en Colombia estimaron que el aporte de residuos vegetales al año por el café bajo sombra fue de 4.15 t/ha y en un período de 365 días se descomponen e incorporan al suelo un 65.4 % de los residuos producidos por el café. Al respecto Cardona y Sadeghian (2005b) reportaron que el contenido de materia orgánica y nitrógeno es más alto en cafetales con sombra en comparación a cafetales a plena exposición. Noriega *et al.* (2014), de sus resultados indican que la mayoría de los suelos cafetaleros presentan valores altos de materia orgánica, y las condiciones de acidez frenan el desarrollo de las bacterias ocurriendo la proliferación de hongos. El pH ácido afecta su humificación y mineralización, debido a la limitada acción bacteriana (Ángel *et al.* 2017). En suelos cafetaleros de República Dominicana la materia orgánica osciló entre 3.0 y 10.8 % bajo un sistema de sombra de árboles frutales o bosque secundario (Núñez *et al.* 2011). Asimismo, los tratamientos T<sub>2</sub>

(Catimor - 4 años) y T<sub>5</sub> (Caturra - 4 años) presentaron los menores promedios de materia orgánica con 1.86 y 1.74 % y de nitrógeno 0.08 % para ambos tratamientos, posiblemente sea resultado de la mineralización de la materia orgánica y aporte de nutrientes favorecidos por el pH que influyen en la actividad de las bacterias.

**Cuadro 19.** Prueba de Duncan ( $\alpha = 0.05$ ) de los tratamientos para la materia orgánica y el nitrógeno del suelo.

Tratamientos	Descripción	M.O. (%)		N. (%)	
		Promedio	Sig.	Promedio	Sig.
T <sub>4</sub>	Caturra - 3 años	3.89	a	0.17	a
T <sub>3</sub>	Catimor - 5 años	3.79	a	0.17	a
T <sub>1</sub>	Catimor - 3 años	3.72	a	0.17	a
T <sub>6</sub>	Caturra - 5 años	3.64	a	0.16	a
T <sub>2</sub>	Catimor - 4 años	1.86	b	0.08	b
T <sub>5</sub>	Caturra - 4 años	1.74	b	0.08	b

Tratamientos unidos por la misma letra en columna no existe significancia estadística.



T<sub>1</sub> Catimor - 3 años T<sub>2</sub> Catimor - 4 años T<sub>3</sub> Catimor - 5 años  
T<sub>4</sub> Caturra - 3 años T<sub>5</sub> Caturra - 4 años T<sub>6</sub> Caturra - 5 años

**Figura 8.** Materia orgánica y nitrógeno del suelo.

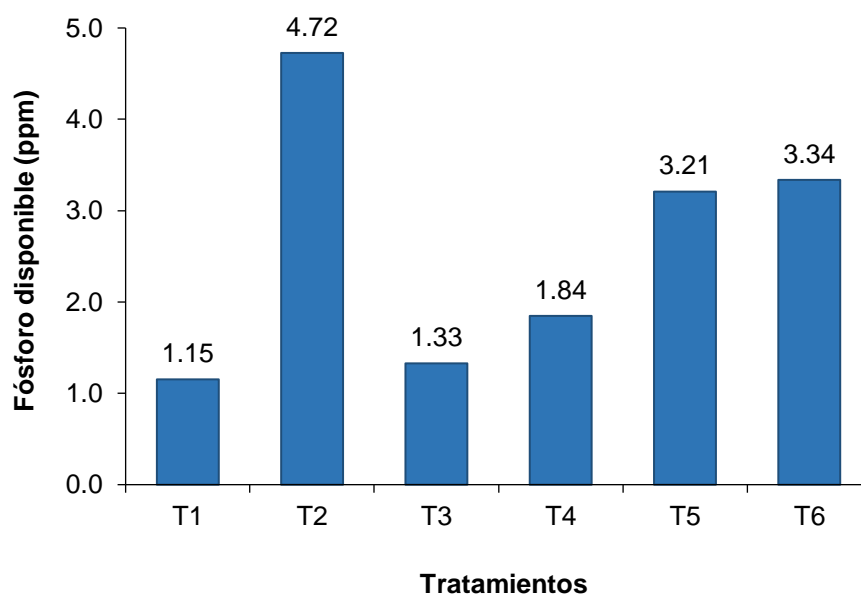
### 4.2.3. Fósforo disponible

En el Cuadro 20, se muestra la prueba de Duncan ( $\alpha = 0.05$ ) de los tratamientos para el fósforo disponible del suelo, donde se observa que no presentaron diferencias estadísticas significativas entre los tratamientos, sin embargo, si se presentó diferencias numéricas (Figura 9), siendo el tratamiento T<sub>2</sub> (Catimor - 4 años) con el mayor promedio de 4.72 ppm de fósforo disponible en el suelo y el tratamiento T<sub>1</sub> (Catimor - 3 años) con el menor promedio de 1.15 ppm. Los promedios de fósforo disponible existentes entre los tratamientos son considerados niveles bajos para este nutriente. Es posible que el fósforo este reaccionando con el Al<sup>+3</sup> formando fosfato de aluminio, quedando el fósforo totalmente insoluble y no sea asimilado por las plantas, ya que estos suelos presentaron problemas con la saturación de aluminio (Cuadro 23) e influenciado a su vez por el pH del suelo, especialmente en los tratamientos que tuvieron los más bajos niveles de fósforo. Toledo (2016) indica que los suelos con pH menores a 6.0 el fósforo forma compuestos con el Fe, Al, Ca y Zn; y por encima de los 7.0, el ácido fosfórico forma compuestos principalmente con el Ca y Mg. Resultados similares fueron obtenidos por Rosas *et al.* (2008), quienes hallaron en suelos cafetaleros de manejo orgánico valores bajos de fósforo disponible con 4.44 ppm, debido a que presentaron pH muy ácido y alto contenido de Aluminio intercambiable.

**Cuadro 20.** Prueba de Duncan ( $\alpha = 0.05$ ) de los tratamientos para el fósforo disponible del suelo.

Tratamientos	Descripción	Fósforo disponible (ppm)	
		Promedio	Sig.
T <sub>2</sub>	Catimor - 4 años	4.72	a
T <sub>6</sub>	Caturra - 5 años	3.34	a
T <sub>5</sub>	Caturra - 4 años	3.21	a
T <sub>4</sub>	Caturra - 3 años	1.84	a
T <sub>3</sub>	Catimor - 5 años	1.33	a
T <sub>1</sub>	Catimor - 3 años	1.15	a

Tratamientos unidos por la misma letra en la columna no existe significancia estadística.



T<sub>1</sub> Catimor - 3 años    T<sub>2</sub> Catimor - 4 años    T<sub>3</sub> Catimor - 5 años  
T<sub>4</sub> Caturra - 3 años    T<sub>5</sub> Caturra - 4 años    T<sub>6</sub> Caturra - 5 años

**Figura 9.** Fósforo disponible del suelo.

#### 4.2.4. Potasio disponible

Del Cuadro 21, de la prueba de Duncan ( $\alpha = 0.05$ ) para el potasio disponible del suelo, se muestra que el tratamiento T<sub>4</sub> (Caturra - 3 años) resultó con el mayor promedio de 168.68 ppm, no diferenciándose estadísticamente de los tratamientos T<sub>2</sub> (Catimor - 4 años), T<sub>1</sub> (Catimor - 3 años) y T<sub>5</sub> (Caturra - 4

años), sin embargo, siendo superior a los tratamientos T<sub>3</sub> (Catimor - 5 años) y T<sub>6</sub> (Caturra - 5 años) quienes presentaron los menores valores con 90.79 y 80.13 ppm de potasio. Los valores bajos de potasio disponible obedecen al pH y CIC bajo presentes en los suelos evaluados (Cuadro 10 y Figura 11), además considerando que los tratamientos T<sub>3</sub> (Catimor - 5 años) y T<sub>6</sub> (Caturra - 5 años) son cafetales de 5 años, requieren mayor demanda de K por los frutos y está influenciada en la concentración de K en los frutos (Laviola *et al.* 2006), disminuyendo su disponibilidad en el suelo en relación a los demás tratamientos que poseen valores medios de potasio, ya que en estos suelos la pérdida de potasio por lixiviación no es tan intensa.

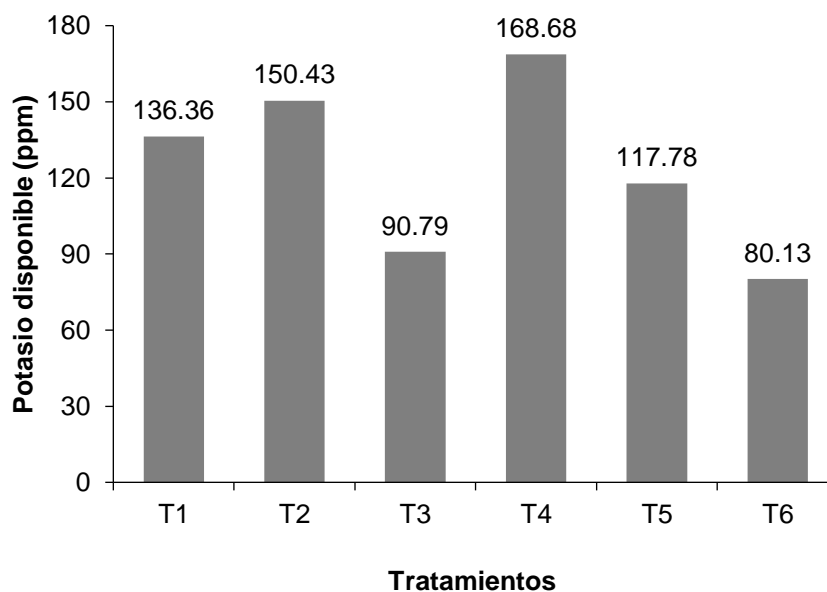
Huamán y Barón (2015) reportaron un nivel medio de K disponible de 194.30 ppm en un suelo de café orgánico en Moyobamba frente a un café bajo un sistema convencional que posee un nivel alto de K de 246.30 ppm, influenciado por la adición de fertilizantes. La disponibilidad de potasio está determinada por factores como el contenido de arcillas, la mineralogía de las arcillas y la cantidad de K intercambiable, este último se considera como la fuente de potasio para las plantas ya que compensa cuando disminuye el contenido de potasio en la solución del suelo. En suelos cafetaleros orgánicos de Colombia bajo sombra se encontraron contenidos mínimos y máximos de K intercambiable de 0.11 y 0.40 Cmol/kg influenciados por un pH promedio de 4.4 y CICe de 7.56 (Silva *et al.* 2017). La disponibilidad del K es dependiente de la concentración de Ca y Mg, ya que el orden para retener las bases de cambio en el complejo de intercambio es  $Ca^{+2} > Mg^{+2} > K^{+}$  (Sadeghian y Zapata 2012; Silva *et al.* 2017). Los suelos arcillosos pueden retener cationes y evitar pérdidas por lixiviación, el contenido

de arcillas presenta una correlación significativa con la CIC, que es reservorio de cationes como  $K^+$  (Lince y Sadeghian 2015), lo que no ocurre en suelos arenosos. Por otra parte, el material orgánico producido por los cafetales bajo sombra en relación con el K reporta un retorno anual de este nutriente equivalente a 48.87 y 55.53 kg/ha/año (Cardona y Sadeghian 2005a), que favorecen su disponibilidad.

**Cuadro 21.** Prueba de Duncan ( $\alpha = 0.05$ ) de los tratamientos para el potasio disponible del suelo.

Tratamientos	Descripción	Potasio (ppm)	
		Promedio	Sig.
T <sub>4</sub>	Caturra - 3 años	168.68	a
T <sub>2</sub>	Catimor - 4 años	150.43	a
T <sub>1</sub>	Catimor - 3 años	136.36	a b
T <sub>5</sub>	Caturra - 4 años	117.78	a b c
T <sub>3</sub>	Catimor - 5 años	90.79	b c
T <sub>6</sub>	Caturra - 5 años	80.13	c

Tratamientos unidos por la misma letra en la columna no existe significancia estadística.



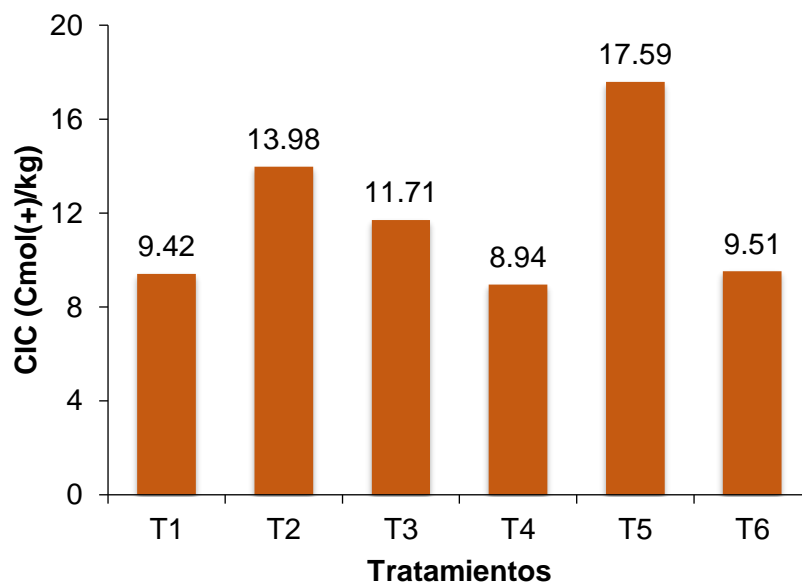
T<sub>1</sub> Catimor - 3 años    T<sub>2</sub> Catimor - 4 años    T<sub>3</sub> Catimor - 5 años  
T<sub>4</sub> Caturra - 3 años    T<sub>5</sub> Caturra - 4 años    T<sub>6</sub> Caturra - 5 años

**Figura 10.** Potasio disponible del suelo.

#### 4.2.5. Capacidad de intercambio catiónico

La Figura 11, presenta los promedios de los tratamientos de la capacidad de intercambio catiónico, donde se observa que los valores más altos se obtuvieron en los tratamientos T<sub>5</sub> (Caturra - 4 años), T<sub>2</sub> (Catimor - 4 años) y T<sub>3</sub> (Catimor - 5 años) a diferencia de los demás.

De acuerdo con López *et al.* (2016), en los suelos cafetaleros de México reportaron un promedio de 16.4 meq/100g de CIC. Según Cardona y Sadeghian (2005b), la CIC hallados en cafetales bajo sombra están atribuidas al porcentaje superior de materia orgánica, sin embargo, en los resultados obtenidos en este trabajo de investigación está influenciada principalmente por el pH del suelo y el aporte de las arcillas encontradas en estos suelos. La mayoría de los suelos de la zona cafetera son de “carga variable o carga dependiente del pH”; es decir, el incremento de la acidez (reducción del pH) significa una disminución de la CICe (Sadeghian 2016). Ángel *et al.* (2017) y López *et al.* (2016) observaron que el 32 % del comportamiento de la CIC es explicado por el nivel de acidez del suelo, los valores más bajos de la CIC se presentaron cuando el pH estuvo por debajo de 5.5 y más altos cuando el pH presentó valores entre 6 y 7; más la materia orgánica explicó un 14.5 %, con poca influencia de las arcillas por poseer una textura franco-arenosa. Sin embargo, Sadeghian y Zapata (2012) señalan que en los suelos con CO < 5 %, la fracción de arcilla puede ser un buen indicador de la retención de los cationes intercambiables. Asimismo, Batjes (1995) citado por Sadeghian y Zapata (2012) indican que existe una relación estrecha entre el contenido de las arcillas y la CIC, siempre y cuando los contenidos de la materia orgánica no superen el 2 %.



T<sub>1</sub> Catimor - 3 años T<sub>2</sub> Catimor - 4 años T<sub>3</sub> Catimor - 5 años  
 T<sub>4</sub> Caturra - 3 años T<sub>5</sub> Caturra - 4 años T<sub>6</sub> Caturra - 5 años

**Figura 11.** Capacidad de intercambio catiónico del suelo.

#### 4.2.6. Calcio y magnesio cambiabile

En el Cuadro 22, se muestra la prueba de Duncan ( $\alpha = 0.05$ ) para el Ca y Mg cambiabile del suelo; referente al Ca se observa que los tratamientos T<sub>2</sub> (Catimor - 4 años) y T<sub>5</sub> (Caturra - 4 años) fueron quienes obtuvieron los mayores valores con 9.23 y 9.18 Cmol(+)/kg, similarmente respecto al Mg los tratamientos T<sub>5</sub> (Catimor - 4 años) y T<sub>2</sub> (Caturra - 4 años) obtuvieron los mejores valores con 1.27 y 1.24 Cmol(+)/kg, siendo superiores estadísticamente de los demás, mientras el tratamiento T<sub>6</sub> (Caturra - 5 años) para Ca y T<sub>3</sub> (Catimor - 5 años) para Mg presentaron los menores promedios.

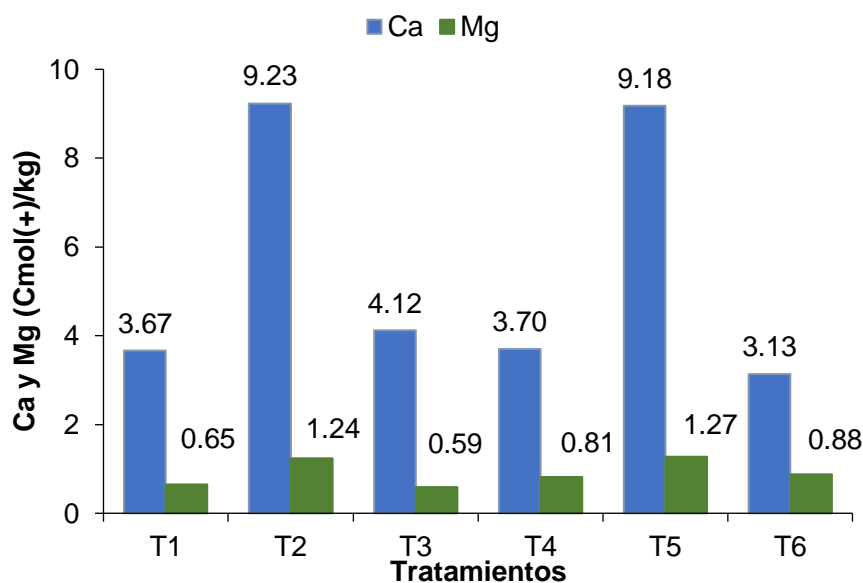
**Cuadro 22.** Prueba de Duncan ( $\alpha = 0.05$ ) de los tratamientos para el Ca y Mg cambiabile del suelo.

Trat.	Descripción	Ca (Cmol(+)/kg)		Trat.	Descripción	Mg (Cmol(+)/kg)	
		Promedio	Sig.			Promedio	Sig.
T <sub>2</sub>	Catimor - 4 años	9.23	a	T <sub>5</sub>	Caturra - 4 años	1.27	a
T <sub>5</sub>	Caturra - 4 años	9.18	a	T <sub>2</sub>	Catimor - 4 años	1.24	a
T <sub>3</sub>	Catimor - 5 años	4.12	b	T <sub>6</sub>	Caturra - 5 años	0.88	b
T <sub>4</sub>	Caturra - 3 años	3.70	b	T <sub>4</sub>	Caturra - 3 años	0.81	b
T <sub>1</sub>	Catimor - 3 años	3.67	b	T <sub>1</sub>	Catimor - 3 años	0.65	b
T <sub>6</sub>	Caturra - 5 años	3.13	b	T <sub>3</sub>	Catimor - 5 años	0.59	b

Tratamientos unidos por la misma letra en la columna no existe significancia estadística.

El contenido de Ca y Mg está en función al pH y la CIC del suelo. Núñez *et al.* (2011), reportaron para el Ca intercambiabile valores entre 2.26 y 43.44 Cmol (+) /kg y Mg entre 0.55 y 3.56 Cmol (+) /kg, influenciadas por la CIC que vario de 4.67 a 46.3 Cmol (+)/kg y los valores de pH. En suelos cafetaleros orgánicos de México se presentaron contenidos de Ca de 2.59 a 7.78 Cmol/kg y Mg 0.47 a 1.93 Cmol/kg referente a un pH menor e igual a 5.0 (Rosas *et al.* 2008). Existe una correlación positiva entre Ca y Mg: el Mg se incrementa conforme a los aumentos del Ca (Sadeghian y Zapata 2012). De acuerdo con el International Plant Nutrition Institute (2014) citado por López *et al.* (2016), los niveles críticos para Ca y Mg es de 0.5 y 0.2 meq/100 g y según Rena *et al.* (1986) citado por Rosas *et al.* (2008), el intervalo óptimo va de 3 a 4 Cmol/kg para Ca y 0.6 a 1.0 Cmol/kg para Mg. Que indica que las parcelas no presentaron deficiencia de Ca y Mg debido a que sus contenidos son mayores a los niveles críticos y la cantidad que hay en el suelo es suficiente para el desarrollo del cafeto.

Por otra parte, la materia orgánica es fuente de Ca y Mg, ya que gran parte de los nutrientes requeridos por las plantas pueden ser obtenidos de la hojarasca en descomposición. La descomposición de la biomasa seca producida por el café transfiere al suelo el 34.3 % del Ca y el 63.1 % de los Mg contenidos en los residuos vegetales (Farfán y Urrego 2007). Asimismo, con la descomposición de la hojarasca proveniente de *Inga spp.*, el cafetal recibe aportes importantes de Ca equivalente a 158.05 y 187.05 kg/ha/año y Mg 27.31 y 30.66 kg/ha/año (Cardona y Sadeghian 2005a).



T<sub>1</sub> Catimor - 3 años T<sub>2</sub> Catimor - 4 años T<sub>3</sub> Catimor - 5 años  
 T<sub>4</sub> Caturra - 3 años T<sub>5</sub> Caturra - 4 años T<sub>6</sub> Caturra - 5 años

**Figura 12.** Calcio y magnesio cambiante del suelo.

#### 4.2.7. Saturación de Aluminio

En el Cuadro 23, se muestra la prueba de Duncan ( $\alpha = 0.05$ ) de la comparación de medias de los tratamientos para la saturación de aluminio del suelo, y se observa que el mayor valor fue presentado por el tratamiento T<sub>3</sub> (Catimor - 5 años) con 55.31 % de saturación de aluminio, no diferenciándose

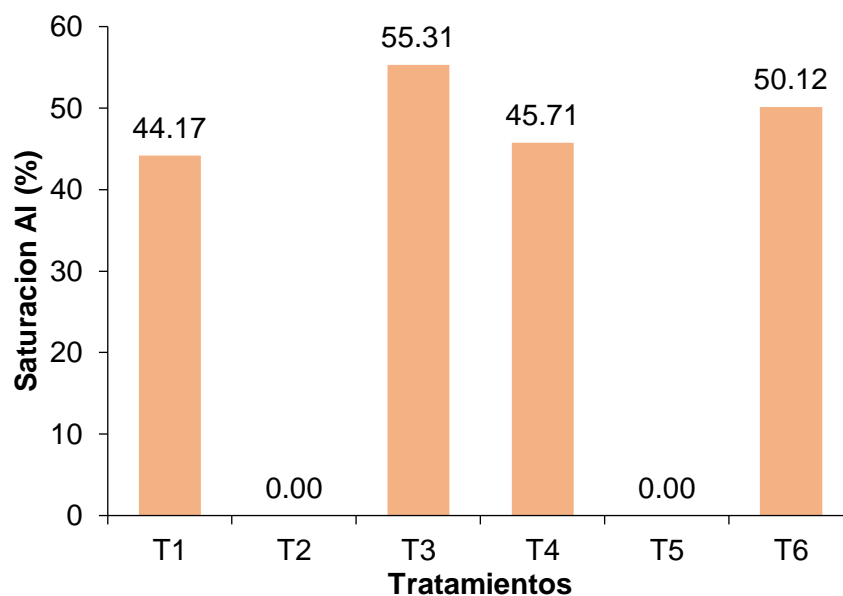
estadísticamente de los tratamientos T<sub>6</sub> (Caturra - 5 años), T<sub>4</sub> (Caturra - 3 años) y T<sub>1</sub> (Catimor - 3 años) con promedios de 50.12, 45.71 y 44.17 % respectivamente. De acuerdo con Quinto *et al.* (2016), en suelos tropicales de Colombia reportaron porcentajes altos de saturación de Al de 57.21 % en suelos extremadamente ácidos. La saturación de aluminio está influenciada por el pH, entre más bajo es el pH del suelo habrá más concentración de aluminio intercambiable Al<sup>+3</sup> (Sadeghian 2016), un 50.21 % de la saturación de Al<sup>+3</sup> es explicada por los niveles de pH en el suelo (Ángel *et al.* 2017), debido a que favorece su solubilidad. Asimismo, la CIC influye también sobre la saturación de aluminio, López *et al.* (2016) observaron que la saturación de Al inicia su incremento cuando la CIC disminuye por debajo de los 10 meq/100 g suelo, como resultado de que el Al es el catión predominante en el complejo de cambio. Según Cardona y Sadeghian (2005b), el valor máximo de aluminio recomendable es 1 Cmol/kg. Los valores de saturación de aluminio por arriba de 25 % son tóxicos para el cultivo de café (Molina 1998 citado por Ángel *et al.* 2017). Así también Núñez *et al.* (2011) reportaron índices de saturación de aluminio entre 0.38 a 20 %, estos valores bajos estuvieron influenciados por los valores altos de materia orgánica que se registraron en estos suelos, en comparación a los suelos estudiados. Ya que la materia orgánica forma complejos con el Al en suelos ácidos con alto contenido de materia orgánica (Ortiz *et al.* 2004). Los tratamientos T<sub>2</sub> (Catimor - 4 años) y T<sub>5</sub> (Caturra - 4 años) no presentaron saturación de aluminio, ya que poseen pH mayores a 5.5 (Cuadro 10) donde no hay problemas por la toxicidad del aluminio. De acuerdo con un estudio realizado por Sadeghian y Zapata (2012) en suelos cafetaleros de

Colombia, la concentración de  $Al^{+3}$  disminuye con el aumento del pH, hasta alcanzar valores menores a 1.0 Cmol/kg cuando el pH es mayor a 5.1.

**Cuadro 23.** Prueba de Duncan ( $\alpha = 0.05$ ) de los tratamientos para la saturación de Al del suelo.

Tratamientos	Descripción	Sat. Al (%)	
		Promedio	Sig.
T <sub>3</sub>	Catimor - 5 años	55.31	a
T <sub>6</sub>	Caturra - 5 años	50.12	a
T <sub>4</sub>	Caturra - 3 años	45.71	a
T <sub>1</sub>	Catimor - 3 años	44.17	a
T <sub>2</sub>	Catimor - 4 años	0.00	b
T <sub>5</sub>	Caturra - 4 años	0.00	b

Tratamientos unidos por la misma letra en la columna no existe significancia estadística.



T<sub>1</sub> Catimor - 3 años    T<sub>2</sub> Catimor - 4 años    T<sub>3</sub> Catimor - 5 años  
 T<sub>4</sub> Caturra - 3 años    T<sub>5</sub> Caturra - 4 años    T<sub>6</sub> Caturra - 5 años

**Figura 13.** Saturación de Aluminio del suelo.

### **4.3. Propiedades biológicas del suelo**

En el Cuadro 32 del Anexo, se muestra el análisis de varianza del índice de diversidad de Shannon-Wiener para los macroorganismos del suelo, donde se observa que a nivel de bloques y tratamientos no presentaron diferencias estadísticas significativas para la variable dependiente índice de diversidad de Shannon-Wiener. Asimismo, el coeficiente de variabilidad de 45.67 %, nos muestra que el 54.33 % del índice de diversidad de Shannon-Wiener se debe al efecto de los tratamientos y el 45.67 % se debe a otros factores.

#### **4.3.1. Índice de diversidad de Shannon-Wiener para macroorganismos del suelo**

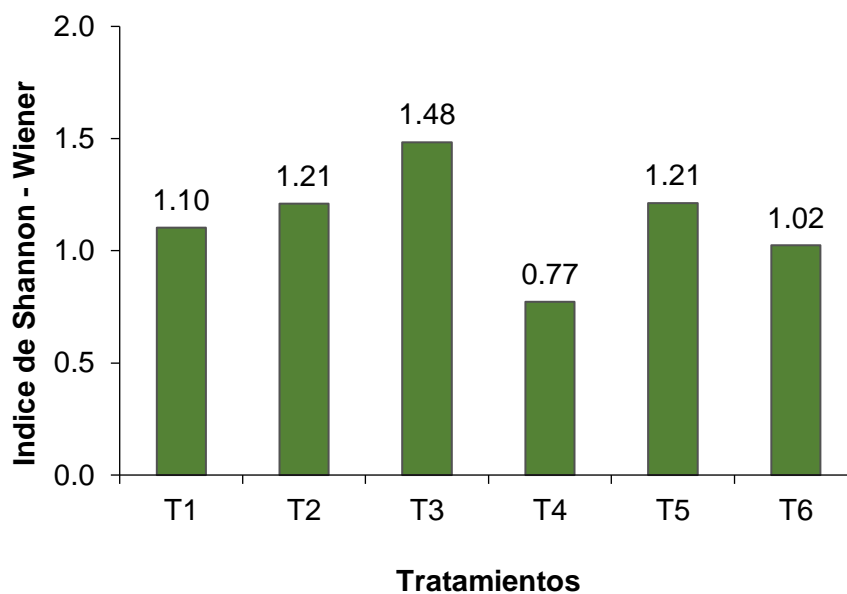
En la Figura 14, se muestra el índice de diversidad de Shannon-Wiener para los macroorganismos del suelo, donde se observa que los valores oscilaron entre 0.77 hasta 1.48 nats/ind. Ñique (2010) considera oportuno encontrar valores a partir de 1.5 - 3.5 nats/ind para dicho índice, siendo el tratamiento T<sub>3</sub> (Catimor - 5 años) con 1.48 nats/ind con el valor más cercano para estar en el rango establecido. Similar comportamiento fue evidenciado por Huarauya (2014), quien reportó en la zona cafetalera (Variedad Caturra - 4 años) del distrito de Hermilio Valdizán un valor de 1.21 nats/ind, similar a los tratamientos T<sub>2</sub> (Catimor - 4 años) y T<sub>5</sub> (Caturra - 4 años).

Luna *et al.* (2012) manifiestan que los cafetales esgrimidos orgánicamente la diversidad de la macrofauna es alta a diferencia de sistemas manejados convencionalmente. De acuerdo con Contreras y Adriazola (2011), los cafetales manejados bajo fertilización química inducen a la menor densidad de la macrofauna, por los efectos tóxicos que producen los fertilizantes al suelo.

Además, las poblaciones de la macrofauna del suelo varían en el espacio y tiempo, disponibilidad de nutrientes, condiciones ambientales, especies vegetales y alteración del ecosistema. Por ejemplo, Delgado *et al.* (2010) señalan cuando los cafetales están asociados a una diversidad de vegetación, esta le proporciona disponibilidad de alimento para las especies, la compleja estructura de la vegetación que provee sitios de hábitat y brinda mejor protección que los sistemas simples (monocultivo); Benzing (2001) citados por Contreras y Adriazola (2011) mencionan que muchas veces disminuye la diversidad de especies, pero incrementa la población total de algunas, probablemente porque se reduce la competencia por otros organismos.

El número de individuos, en los seis tratamientos fueron 370 (Cuadro 43 del Anexo), los valores más altos estuvieron representados por el orden Haplotaxida (lombriz de tierra), Isopoda (termitas, cochinilla) e Hymenoptera (hormigas), este último según Cabrera (2012), las hormigas son indicadores de la perturbación del medio edáfico, tienen la capacidad de sobrevivir mayormente en suelos agrícolas, a pesar de las alteraciones que se producen en dicho medio, evidenciando su prevalencia en abundancia y resistencia en sistemas de intervención antrópica. En general son organismos considerados ingenieros del suelo, desempeñan un papel importante en la descomposición y reciclaje de la M.O (Brown 2001). Además, son responsables de los cambios físicos en el medio edáfico (Jiménez *et al.* 2003). Y en menor cantidad se encontraron el orden Stylommatophora (caracol), Diplopoda (milpies) y Lepidóptera (oruga); muchos son los factores que intervienen en la

disminución de la población de organismos del suelo, tal como se explicó anteriormente.



T<sub>1</sub> Catimor - 3 años T<sub>2</sub> Catimor - 4 años T<sub>3</sub> Catimor - 5 años  
 T<sub>4</sub> Caturra - 3 años T<sub>5</sub> Caturra - 4 años T<sub>6</sub> Caturra - 5 años

**Figura 14.** Índice de diversidad de Shannon-Wiener para los macroorganismos del suelo.

#### 4.4. Características biométricas del café

En el Cuadro 33 del Anexo, se presenta el análisis de varianza de las características biométricas del café, donde nos indica que no mostraron diferencias estadísticas significativas a nivel de bloques en ninguna de las variables evaluadas, mientras que a nivel de tratamientos el número de ramas, profundidad de raíces y proyección de la copa presentaron alta significancia estadística, sin embargo, el diámetro de tallo, altura de planta, longitud de la rama más grande y área radicular no presentaron significancia estadística. Los coeficientes de variación presentados fueron 19.30, 19.19, 14.27, 7.51, 18.88, 46.49 y 19.34 % para el diámetro de tallo, altura de planta, longitud de la rama

más grande, número de ramas, profundidad de raíces, área radicular y proyección de la copa correspondientemente.

#### **4.4.1. Número de ramas**

En el Cuadro 24, se presenta la comparación de medias de la prueba de Duncan ( $\alpha = 0.05$ ) para el número de ramas del cafeto, donde los tratamientos T<sub>4</sub> (Caturra - 3 años), T<sub>2</sub> (Catimor - 4 años) y T<sub>6</sub> (Caturra - 5 años) obtuvieron los mayores promedios con 77, 73 y 69, sin diferenciarse estadísticamente entre ellos, mientras que los tratamientos T<sub>3</sub> (Catimor - 5 años), T<sub>1</sub> (Catimor - 3 años) y T<sub>2</sub> (Catimor - 4 años) presentaron los menores promedios con 58, 57 y 56.

Arcila (2007a) señala que el número de ramas es una “característica morfológica” del cafeto que se asocia con la productividad, de las cuales se van a generar ramas primarias y secundarias que van a ser responsables de la producción de hojas, flores y frutos; cuando hay un buen suministro de agua, nutrientes y luz el crecimiento de ramas es más activo. Coronel (2019) describe que la variedad Catimor y Catura se caracterizan por tener el ángulo de inserción de las ramas plagiotrópicas semi-erecta, la peculiaridad de ramificación para Catimor es que muchas de las ramas plagiotrópicas primarias tienen algunas ramas plagiotrópicas secundarias, dando origen a una copa compacta y de gran vigorosidad, mientras que la variedad caturra tiene pocas ramas plagiotrópicas con algunas ramas secundarias.

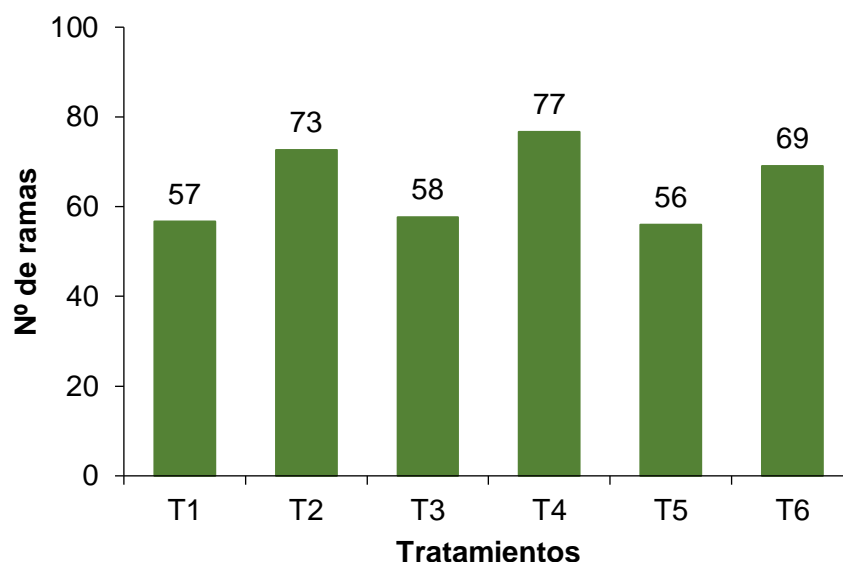
Julca *et al.* (2018) hallaron en la variedad Catimor - 4 años un promedio de 35 ramas por planta, difiriendo en 38 ramas del tratamiento T<sub>2</sub> (Catimor - 4 años). Esta variedad se caracteriza por tener ramas laterales

abundantes con numerosas ramificaciones secundarias que dan a la planta una apariencia vigorosa y frondosa (Fischersworing y Robkamp 2001 citado por Benegas 2009). En la variedad Caturra, Salazar *et al.* (1988) registraron en el periodo de 2.5 - 5 años de la planta un promedio de 81 ramas primarias. Los mismos autores señalan que la disminución del número de ramas primarias se dio a partir de los 4 años, posiblemente por la disminución de la actividad meristemática ortotrópica, esto se observó en la altura de las plantas y en la pérdida de ramas primarias más bajas por la competencia de la luz debido a la alta densidad de siembra (10 000 plantas/ha<sup>-1</sup>). Además, en el mismo periodo se encontró un promedio de 35 ramas productivas (45 %) respecto al total de ramas. Las oscilaciones del número de ramas productivas a través del tiempo se explicaron por las variaciones del ritmo de crecimiento de la planta, consecuencia de las condiciones climáticas específicas de la región: la distribución de lluvias y el balance hídrico.

**Cuadro 24.** Prueba de Duncan ( $\alpha = 0.05$ ) de los tratamientos para el número de ramas.

Tratamientos	Descripción	N.º de ramas	
		Promedio	Sig.
T <sub>4</sub>	Caturra - 3 años	77	a
T <sub>2</sub>	Catimor - 4 años	73	a
T <sub>6</sub>	Caturra - 5 años	69	a
T <sub>3</sub>	Catimor - 5 años	58	b
T <sub>1</sub>	Catimor - 3 años	57	b
T <sub>5</sub>	Caturra - 4 años	56	b

Tratamientos unidos por la misma letra en la columna no existe significancia estadística.



T<sub>1</sub> Catimor - 3 años T<sub>2</sub> Catimor - 4 años T<sub>3</sub> Catimor - 5 años  
 T<sub>4</sub> Caturra - 3 años T<sub>5</sub> Caturra - 4 años T<sub>6</sub> Caturra - 5 años

**Figura 15.** Número de ramas.

#### 4.4.2. Profundidad radicular

En el Cuadro 25, se muestra la comparación de medias de la prueba de Duncan ( $\alpha = 0.05$ ) de los tratamientos para la profundidad radicular del cafeto, donde se observa que los tratamientos T<sub>6</sub> (Caturra - 5 años), T<sub>4</sub> (Caturra - 3 años), T<sub>1</sub> (Catimor - 3 años) y T<sub>3</sub> (Catimor - 5 años) alcanzaron los valores máximos con 62.33, 60.33, 56.67 y 54.67 cm, sin embargo no presentaron diferencias estadísticas significativas entre ellos, mientras que los tratamientos T<sub>5</sub> (Caturra - 4 años) y T<sub>2</sub> (Catimor - 4 años) presentaron los valores más bajos con 31.00 y 26.67 cm, sin diferenciarse estadísticamente entre ambos.

**Cuadro 25.** Prueba de Duncan ( $\alpha = 0.05$ ) de los tratamientos para la profundidad radicular.

<b>Profundidad radicular (cm)</b>			
<b>Tratamientos</b>	<b>Descripción</b>	<b>Promedio</b>	<b>Sig.</b>
T <sub>6</sub>	Caturra - 5 años	62.33	a
T <sub>4</sub>	Caturra - 3 años	60.33	a
T <sub>1</sub>	Catimor - 3 años	56.67	a
T <sub>3</sub>	Catimor - 5 años	54.67	a
T <sub>5</sub>	Caturra - 4 años	31.00	b
T <sub>2</sub>	Catimor - 4 años	26.67	b

Tratamientos unidos por la misma letra en la columna no existe significancia estadística.

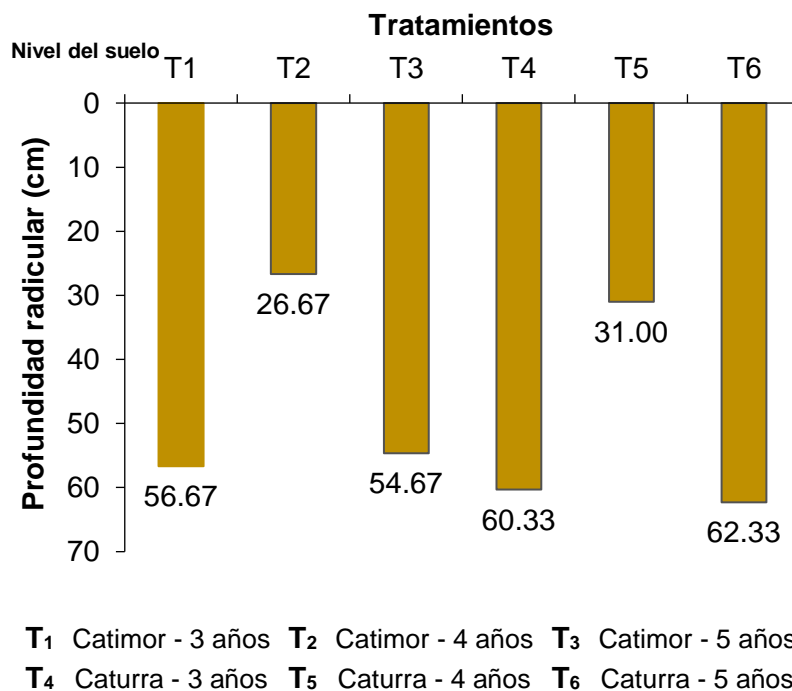
En su mayoría fueron raíces laterales sub-superficiales las que alcanzaron mayor profundidad (Figura 28 y 29 del Anexo), estas no se desarrollan paralelas a la superficie del suelo, crecen a mayor profundidad y se extienden en todos los planos. De 4 a 8 raíces axiales penetran verticalmente hasta 2 ó 3 metros de profundidad. Estas raíces surgen lateralmente o en la bifurcación de la raíz pivotante, se ramifican en todas direcciones a diferentes profundidades; cuando las raíces penetran a capas más profundas del suelo aprovechan el agua y los minerales esenciales para su crecimiento, además les sirve para un mejor anclaje (Arcila 2007a).

Gil y Díaz (2016) indican que la restricción en el espacio de enraizamiento afecta el crecimiento radical, cuando estas no evidencian obstáculos físicos para llegar al fondo muestran mayor longitud de la raíz pivotante, biomasa radical y volumen de raíces. Según el Usda (1999), hay una relación entre la densidad aparente del suelo y el crecimiento radicular: a medida que incrementa la profundidad del suelo aumenta la densidad aparente, por lo

tanto, limita el crecimiento vertical de la raíz, es por ello por lo que la mayor proporción de raíces se encuentra en las primeras capas del suelo, así lo evidenció López (2012), donde encontró a una profundidad de 0 - 10 cm del suelo mayor cantidad de raíces finas; Ronchi *et al.* (2015) realizaron un trabajo de investigación sobre las respuestas morfológicas del sistema radicular en cuatro variedades de café mayores a 3 años, donde evidenciaron que la mayor cantidad de raíces se encuentra a los 10 cm de profundidad del suelo con respecto a los 40 cm en las cuatro variedades; Rendón y Giraldo (2019) encontraron que a los primeros 25 cm de distancia horizontal medidos a partir de la base del tallo se encuentra la mayor densidad de raíces finas y totales; la proporción de raíces totales hasta los 25 cm de profundidad es 86.3 y 86.4 % en los arreglos espaciales de 1 x 1 m y de 1 x 2 m, bajo este estudio recomiendan hacer una fertilización a una distancia de 25 cm desde la base del tallo.

Similarmente a las raíces del café, los árboles forestales manifiestan mayor proporción de raíces hasta los 30 cm del suelo con valores que oscilan entre 68 - 83 % (Barreto y León 2005). Las raíces profundas aprovechan la cantidad de nitrato acumulado en el subsuelo (80 - 200 cm) y podrían ponerse a disponibilidad del cultivo de café a través de la materia orgánica (hojarasca) que los árboles regresan al suelo (Harmand *et al.* 2010).

Es necesario resaltar que la edad y la variedad del café no son factores determinantes en el crecimiento y desarrollo de las raíces, son las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo las que estarían afectando el crecimiento vertical de las raíces.



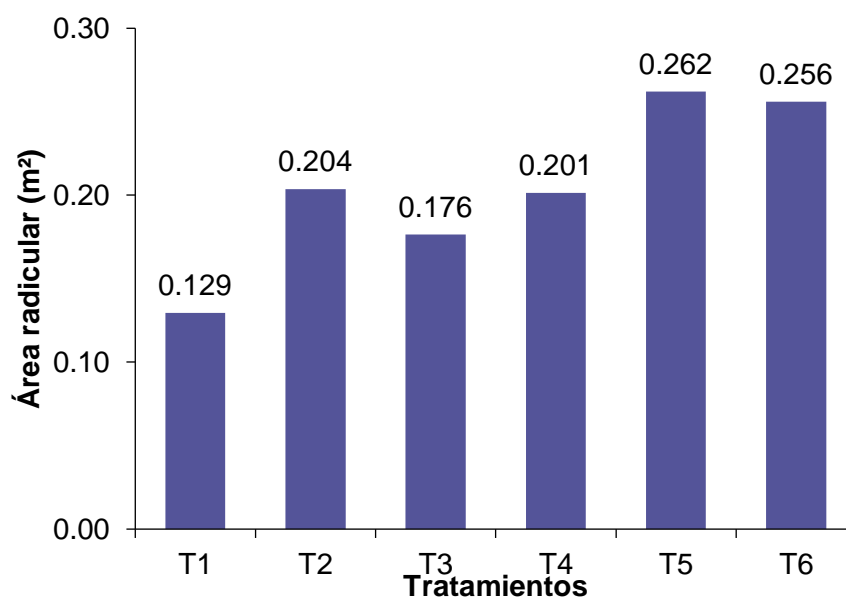
**Figura 16.** Profundidad radicular.

#### 4.4.3. Área radicular

En la Figura 17, se presenta los promedios de los diferentes tratamientos para el área radicular del cafeto, los cuales no evidenciaron diferencias estadísticas significativas, pero numéricamente los tratamientos T<sub>5</sub> (Caturra - 4 años) y T<sub>6</sub> (Caturra - 5 años) evidenciaron los mayores promedios con 0.262 y 0.256 m<sup>2</sup>, mientras que el tratamiento T<sub>1</sub> (Catimor - 3 años) obtuvo el menor valor con 0.129 m<sup>2</sup>. En la Figura 31 del Anexo, se observa la digitalización de las raíces en el software AutoCAD 2018, donde se muestra la distribución horizontal y vertical que ocupan las raíces en el suelo.

Kafkafi (2008) manifiesta que el crecimiento radicular es un proceso continuo fundamental para el desarrollo de las plantas. Según Arcila (2007a), la edad de la planta determina el crecimiento y desarrollo de las raíces, las plantas jóvenes muestran una raíz pivotante bastante ramificada que predomina sobre

las raíces laterales, mientras que en las plantas adultas la raíz pivotante central reduce su diámetro abruptamente y rara vez alcanza una profundidad mayor a 45 cm. Sin embargo, si las condiciones físicas y químicas del suelo no son adecuadas las raíces del cafeto limitan su crecimiento. Arcila (1992) señala que los suelos de textura franco son ideales para el desarrollo y distribución radicular, pero cuando los suelos presentan pH muy ácidos, alta saturación de aluminio (mayor a 60 %), niveles bajos en materia orgánica y bajo contenido de fósforo se produce un deficiente desarrollo radicular. Es preciso mencionar que todos los suelos de los tratamientos fueron deficientes en fósforo (Cuadro 20).



T<sub>1</sub> Catimor - 3 años T<sub>2</sub> Catimor - 4 años T<sub>3</sub> Catimor - 5 años  
 T<sub>4</sub> Caturra - 3 años T<sub>5</sub> Caturra - 4 años T<sub>6</sub> Caturra - 5 años

**Figura 17.** Área radicular.

#### 4.4.4. Proyección de la copa

En el Cuadro 26, se presenta la comparación de medias de la prueba de Duncan ( $\alpha = 0.05$ ) para la proyección de la copa del cafeto, se muestra que el tratamiento T<sub>3</sub> (Catimor - 5 años) con 0.93 m<sup>2</sup> fue numérica y

estadísticamente superior a los tratamientos T<sub>6</sub> (Caturra - 5 años), T<sub>2</sub> (Catimor - 4 años), T<sub>5</sub> (Caturra - 4 años), T<sub>4</sub> (Caturra - 3 años) y T<sub>1</sub> (Catimor - 3 años) con 0.67, 0.59, 0.53, 0.51 y 0.45 m<sup>2</sup>, pero sin diferenciarse estadísticamente entre ellos.

**Cuadro 26.** Prueba de Duncan ( $\alpha = 0.05$ ) de los tratamientos para la proyección de la copa.

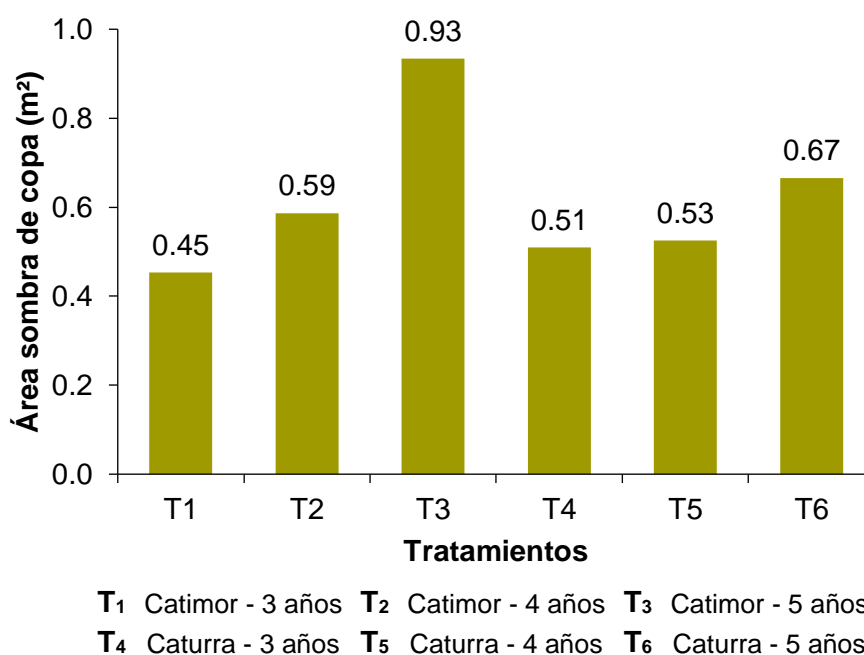
Tratamientos	Descripción	Proyección de la copa del café m <sup>2</sup>	
		Promedio	Sig.
T <sub>3</sub>	Catimor - 5 años	0.93	a
T <sub>6</sub>	Caturra - 5 años	0.67	b
T <sub>2</sub>	Catimor - 4 años	0.59	b
T <sub>5</sub>	Caturra - 4 años	0.53	b
T <sub>4</sub>	Caturra - 3 años	0.51	b
T <sub>1</sub>	Catimor - 3 años	0.45	b

Tratamientos unidos por la misma letra en la columna no existe significancia estadística.

La proyección de la copa es una característica muy importante para establecer el distanciamiento de siembra del cafeto; la longitud horizontal de las raíces es igual a la proyección de la sombra del cafeto, cuando la planta proyecta buena sombra y está sembrada a una distancia corta existirá competencia de nutrientes entre las raíces y luz entre la parte aérea, ya que estas también se entrecruzarían. La sombra proyectada por la planta de café hacia el suelo es un factor muy significativo para disminuir la competencia entre el café y las plantas arvenses y por la constante incorporación de hojarasca del cafeto al suelo (Fournier 1988 citado por Balladares *et al.* 2005).

Aguilar (2000) registró que las plantaciones de café asociadas a diferentes árboles forestales, la proyección de la copa del cafeto puede variar de

0.50 a 0.53 m<sup>2</sup>, mientras que en los cafetales a pleno con 0.59 m<sup>2</sup>. También Balladares *et al.* (2005) reportaron el efecto de la sombra de los árboles forestales y los fertilizantes sobre la proyección de la copa del cafeto, el cual registró 1.89 m<sup>2</sup>, plantaciones con sombra y sin fertilizante halló 2.09 m<sup>2</sup> y plantaciones a pleno sol y con fertilizante alcanzó 2.32 m<sup>2</sup>. Es decir, la sombra de los árboles forestales y la fertilización que se le otorga al cultivo ejercen un efecto en la proyección de la copa del cafeto; se ha encontrado que los suelos estudiados presentaron deficiencia de fósforo disponible.



**Figura 18.** Proyección de la copa.

#### 4.5. Análisis químico de macro y microelementos de las hojas de café

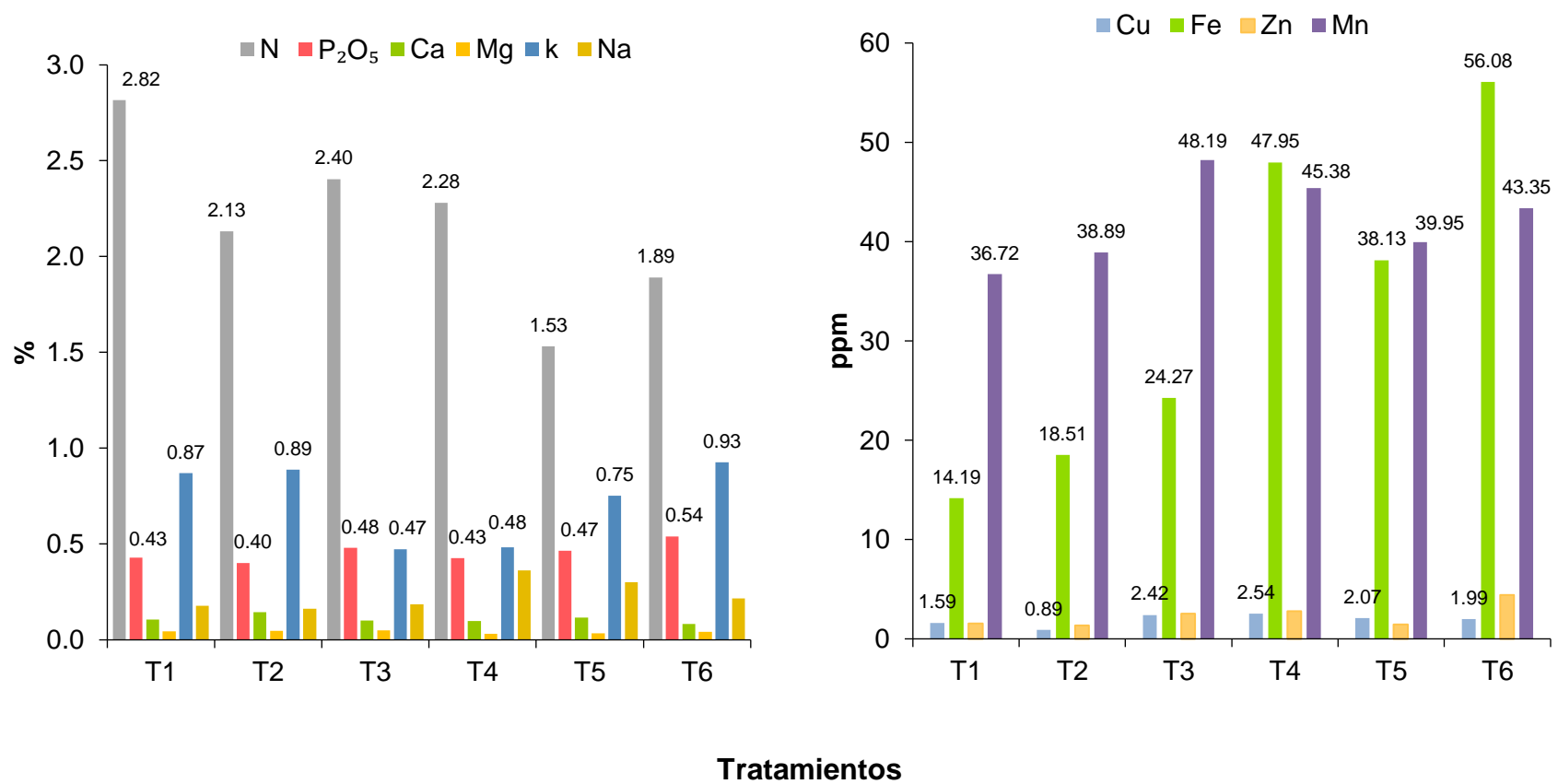
De acuerdo con el Cuadro 34 y 35 del Anexo, de los resultados del análisis de varianza para el análisis químico de macro y microelementos de las hojas de café, indica que no existe diferencia significativa en ninguna de las fuentes de variación para las variables analizadas, excepto en N a nivel de bloques que

presenta significancia. Con coeficientes de variación de 6.24 % en humedad, 5.60 % en materia seca, 22.38 % en N, 31.09 % en  $P_2O_5$ , 37.97 % en Ca, 21.78 % en Mg, 34.64 % en K, 44.70 % en Na, 55.84 % en Cu, 92.87 % en Fe, 81.63 % en Zn y 61.13 % en Mn. Los altos coeficientes de variabilidad obtenidos no se deben al efecto de los tratamientos, probablemente sea la influencia de otros factores.

En la Figura 19, se presenta los promedios de los macro y microelementos en las hojas del café para los tratamientos, donde se observa que el nitrógeno presenta mayores valores en todos los tratamientos y respecto a los demás macroelementos destacando el tratamiento T<sub>1</sub> (Catimor - 3 años), seguidamente de fósforo ( $P_2O_5$ ) y potasio, más los elementos de menores valores son el calcio, magnesio y sodio. Laviola *et al.* (2006) señalan que en las hojas de ramas productivas observaron descensos en las concentraciones de N al inicio del periodo reproductivo (floración), habiendo recuperación posteriormente. Mientras que, Marín *et al.* (2018) hallaron durante la floración que los macronutrientes (N, P, K, Ca y Mg) estuvieron en mayor concentración, mientras que en la etapa de fructificación con excepción del N estos se encontraron en menores concentraciones en las hojas de café. Las concentraciones de N y K en hojas y frutos no solo son influenciadas por los niveles de fertilización empleados, sino también por otros factores que determinan la tasa de distribución de los elementos minerales en las plantas de café, como la carga pendiente de frutos (Laviola *et al.*, 2006). Según Henao y Hernández (2002), el balance entre los contenidos de  $K^+$  con respecto al Mg y Ca en la solución del suelo tiene una mayor importancia en el pronóstico de los niveles de potasio presentes en las hojas de la planta de café, que el balance de cationes intercambiables. Las plantas de café cultivadas en un

sistema agroforestal promueven el aumento de los contenidos de macronutrientes en el tejido de la hoja, alcanzando niveles similares de la plantación de café en un sistema convencional (Carmo *et al.* 2014).

Con respecto a los microelementos el Fe y Mn presentaron los valores más altos en todos los tratamientos, lo cual puede corresponder a la alta disponibilidad de estos elementos en la solución del suelo favorecido por el pH (Figura 7), en comparación a Zn y Cu. Obedece a la disponibilidad de los nutrientes de la fertilidad natural del suelo, ya que no se suministraron micronutrientes vía fertilización. Marín *et al.* (2018), de la concentración de micronutrientes en hojas de café variedad Caturra durante el ciclo anual del cultivo reportaron que en la etapa vegetativa de la planta mostraron mayor concentración de hierro (144.70 mg/kg), en la floración destacaron por su concentración el cobre (6.56 mg/kg) y el zinc (11.04 mg/kg), mientras que el manganeso fue el más abundante en las tres etapas evaluadas del cultivo. Sadeghian y Salamanca (2015) observaron que en plantaciones de café las concentraciones foliares de Mn, Fe, B, Zn y Cu durante el periodo comprendido entre la floración y la fructificación atribuyeron estos cambios a las fluctuaciones de estos elementos en la solución del suelo y a las variaciones climáticas antes que a la demanda por los frutos.



**Figura 19.** Análisis químico de macro y microelementos de las hojas de café.

#### **4.6. Análisis químico de macro y microelementos de las raíces de café**

Del Cuadro 36 y 37 del Anexo, de los resultados del análisis de varianza para el análisis químico de macro y microelementos de las raíces de café, se observa que no existió significancia estadística a nivel de bloques; a nivel de tratamientos el sodio, fierro y manganeso presentaron alta significancia estadística, mientras que la humedad, materia seca, N, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, Ca, Mg, k, Cu y Zn no presentaron diferencias estadísticas significativas. Los coeficientes de variación para la humedad, materia seca, N, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, Ca, Mg, k, Na, Cu, Zn, Fe, Zn y Mn fueron 6.28, 0.01, 27.29, 14.18, 36.41, 31.68, 53.23, 35.35, 63.24, 24.36, 30.26 y 27.93 % respectivamente. Los altos coeficientes de variabilidad obtenidos no corresponden al efecto de los tratamientos, probablemente sea la influencia de otros factores.

##### **4.6.1. Sodio, fierro y manganeso en la raíz**

En el Cuadro 27, se presenta la comparación de medias de la prueba de Duncan ( $\alpha = 0.05$ ) para el contenido de sodio en el tejido radicular, donde se muestra que el tratamiento T<sub>2</sub> (Catimor - 4 años) con 0.33 % fue numérica y estadísticamente superior a los demás tratamientos, siendo el tratamiento T<sub>6</sub> (Caturra - 5 años) con 0.05 % con el valor más bajo; para el contenido de hierro en el tejido radicular, los tratamientos T<sub>5</sub> (Caturra - 4 años), T<sub>6</sub> (Caturra - 5 años) y T<sub>4</sub> (Caturra - 3 años) presentaron los promedios más altos con 63.97, 59.43 y 48.49 ppm, sin diferenciarse estadísticamente entre ellos; y por último, el contenido de manganeso en el tejido radicular, los tratamientos T<sub>5</sub> (Caturra - 4 años) y T<sub>3</sub> (Catimor - 5 años) presentaron los promedios más altos con 58.48 y 47.26 ppm, pero sin diferenciarse estadísticamente entre ambos, a

su vez, el tratamiento T<sub>2</sub> (Catimor - 4 años) presentó el promedio más bajo con 14.17 ppm.

**Cuadro 27.** Prueba de Duncan ( $\alpha = 0.05$ ) de los tratamientos para sodio, fierro y manganeso en la raíz.

Trat.	Na %		Trat.	Fe ppm		Trat.	Mn ppm	
	Prom.	Sig.		Prom.	Sig.		Prom.	Sig.
T <sub>2</sub>	0.33	a	T <sub>5</sub>	63.97	a	T <sub>5</sub>	58.48	a
T <sub>5</sub>	0.19	b	T <sub>6</sub>	59.43	a	T <sub>3</sub>	47.26	a b
T <sub>3</sub>	0.19	b	T <sub>4</sub>	48.49	a	T <sub>4</sub>	38.95	b c
T <sub>1</sub>	0.15	b c	T <sub>2</sub>	18.72	b	T <sub>6</sub>	30.91	b c d
T <sub>4</sub>	0.12	b c	T <sub>1</sub>	17.68	b	T <sub>1</sub>	21.16	c d
T <sub>6</sub>	0.05	c	T <sub>3</sub>	16.93	b	T <sub>2</sub>	14.17	d

T<sub>1</sub>: Catimor - 3 años; T<sub>2</sub>: Catimor - 4 años; T<sub>3</sub>: Catimor - 5 años; T<sub>4</sub>: Caturra - 3 años; T<sub>5</sub>: Caturra - 4 años; T<sub>6</sub>: Caturra - 5 años. Tratamientos unidos por la misma letra en la columna no existe significancia estadística.

La cantidad de nutriente acumulado por el café varía según la edad, órganos y tejidos de una misma planta. Especialmente, la raíz tiene una “capacidad limitada para la absorción selectiva de los nutrientes minerales” que están relacionados a su crecimiento, puede asimilar tanto elementos esenciales como no esenciales para su desarrollo, pero en cierta medida algunos elementos serán más priorizados que otros (Lastra 2019).

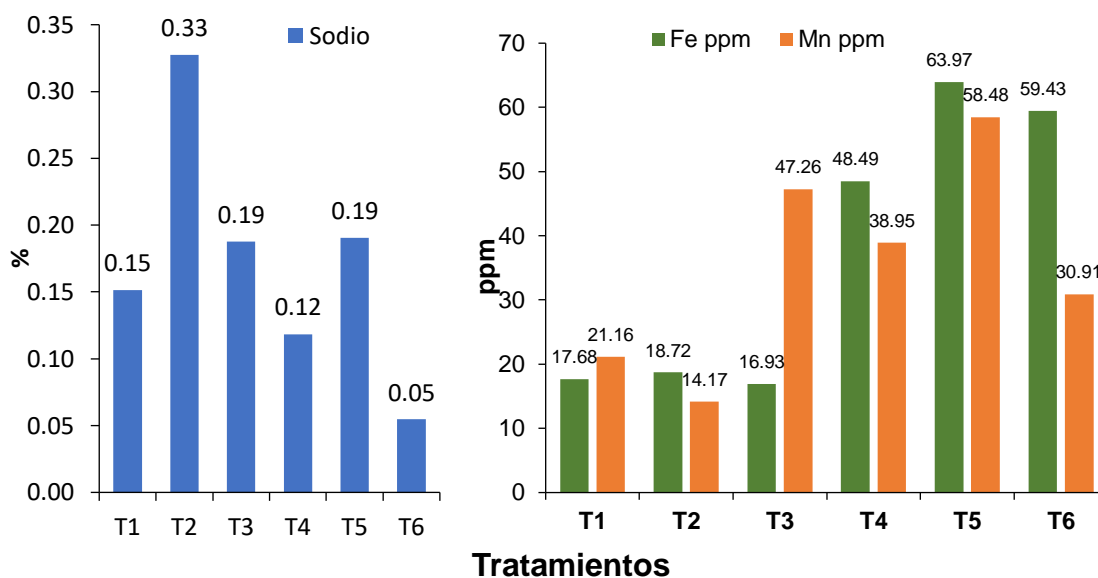
El sodio (Na<sup>+</sup>) no es considerado un mineral esencial para las plantas, Wu (2018) señala que la raíz es el primer órgano en estar en contacto con la salinidad (el sodio entra primero a las raíces y luego se transporta a los brotes). Los suelos salinos incrementan la tasa de absorción de sodio (Na<sup>+</sup>) tanto en las raíces, tallos y hojas en la etapa de crecimiento de la planta (Villa *et al.* 2006). De manera que, las altas concentraciones de sales en el suelo producen

una disminución en el largo de las raíces y, por tanto, también de una disminución del volumen de suelo que las raíces puedan explorar para absorber agua y nutrientes (Goykovic y Saavedra 2007).

Welch y Shuman (1995) señalan que el hierro (Fe) es un elemento que está relacionado al desarrollo del cloroplasto, síntesis de ferredoxina y la clorofila. Considerando que el hierro ( $\text{Fe}^{+2}$ ) es absorbido significativamente por las raíces, mientras que el hierro ( $\text{Fe}^{+3}$ ) precisa ser reducido en la superficie de las raíces antes de ser llevado al citoplasma. En cuanto a su disponibilidad en el suelo, Aguado *et al.* (2012) indican que la concentración de hierro disponible disminuye rápidamente a medida que aumenta el pH del suelo, con un mínimo alrededor de “7.4 a 8.5”; a partir de este rango de valores, se produce deficiencia de hierro, especialmente en suelos “calcáreos”.

El manganeso es absorbido por las raíces como “catión manganeso ( $\text{Mn}^{+2}$ )”, aunque en el suelo también puede estar como “ $\text{Mn}^{+3}$  o  $\text{Mn}^{+4}$ , óxidos insolubles y quelatos”. Su solubilidad disminuye en suelos alcalinos o ácidos con alto contenido de M.O (Rodríguez y Flórez 2004). Las altas concentraciones de manganeso disminuyen el área foliar y la materia seca (Casierra y Poveda 2005).

Hay dos tipos de mecanismos que pueden explicar la “resistencia de las plantas a la toxicidad de iones metálicos”, como son: La anulación, que implica varias formas de prevenir el acceso de los iones tóxicos a los sitios designados, y la tolerancia, mediante la resistencia a la entrada de los iones metálicos al “simplasma” (Ernst 1996; Hall 2002).



T<sub>1</sub> Catimor - 3 años T<sub>2</sub> Catimor - 4 años T<sub>3</sub> Catimor - 5 años  
 T<sub>4</sub> Caturra - 3 años T<sub>5</sub> Caturra - 4 años T<sub>6</sub> Caturra - 5 años

**Figura 20.** Sodio, fierro y manganeso en la raíz.

#### 4.7. Rendimiento del cultivo de café en kg/planta y qq/ha<sup>-1</sup>

En el Cuadro 38 del Anexo, se presenta el análisis de varianza del rendimiento del café, donde se muestra que a nivel de bloques no se presentó diferencias estadísticas significativas, mientras que a nivel de tratamientos las variables de kg/planta y qq/ha<sup>-1</sup> si mostraron diferencias estadísticas altamente significativas. Asimismo, el coeficiente de variabilidad de 9.58 %, nos muestra que el 90.42 % del rendimiento en kg/planta y qq/ha<sup>-1</sup> se debe al efecto de los tratamientos y el 9.58 % se debe a otros factores.

En el Cuadro 28 y Figura 21, se presenta la comparación de medias de la prueba de Duncan ( $\alpha = 0.05$ ) para el rendimiento del café en kg/planta y qq/ha<sup>-1</sup>, donde se observa que los tratamientos T<sub>3</sub> (Catimor 5 - años) y T<sub>6</sub> (Caturra - 5 años) fueron numérica y estadísticamente superiores a los tratamientos T<sub>2</sub> (Catimor 4 - años) y T<sub>1</sub> (Caturra - 4 años), quienes presentaron rendimientos

medios, pero sin diferenciarse estadísticamente entre ambos, a su vez estos fueron superiores a los tratamientos T<sub>1</sub> (Catimor - 3 años) y T<sub>4</sub> (Caturra - 3 años) quienes presentaron los rendimientos más bajos. Sin embargo, es importante señalar que los seis tratamientos estuvieron por encima del promedio nacional estimado en 13 qq/ha según el Minagri (2018). El rendimiento obtenido por el tratamiento T<sub>2</sub> (Catimor - 4 años) con 0.35 kg/planta fue inferior a los resultados obtenidos por Berlingeri *et al.* (2007), quienes encontraron en la variedad Catimor - líneas (B18 6/3) y (B4 3/5) valores de 2.85 y 2.63 kg/planta, mientras que Julca *et al.* (2018) reportaron bajo un manejo convencional en la variedad Catimor - 4 años un rendimiento promedio de 0.33 kg/planta.

Los factores que determinan el rendimiento del cultivo de café son la edad y genética de la planta, condiciones ambientales (clima y suelo) y prácticas de cultivo (Arcilla 2007b). Las características morfológicas del café inciden en el rendimiento: las ramas plagiotrópicas o primarias son encargadas de la producción, según Salazar *et al.* (1988), el porcentaje de ramas productivas respecto al total de ramas en el café está cercano al 45 %. El rendimiento se asocia al número de frutos/ramas, tamaño y peso respectivamente; las condiciones de altitud (msnm) son favorables para un buen llenado de granos, lo que proporciona una producción de granos de mayor densidad (Buenaventura y Castaño 2002). A su vez, las raíces del cafeto desempeñan un papel fundamental en el crecimiento y desarrollo de la planta; el 86 % de raíces absorbentes y 89.9 % de raíces totales del cafeto se encuentra a los 30 cm de profundidad, a esta profundidad del suelo las raíces necesitan buena disponibilidad de agua y nutrientes (Arcila 2007a). Cuando los suelos presentan

pH muy ácidos, alta saturación de aluminio (mayor a 60 %), niveles bajos en materia orgánica y bajo contenido de fósforo se produce un deficiente desarrollo radicular (Arcila 1992).

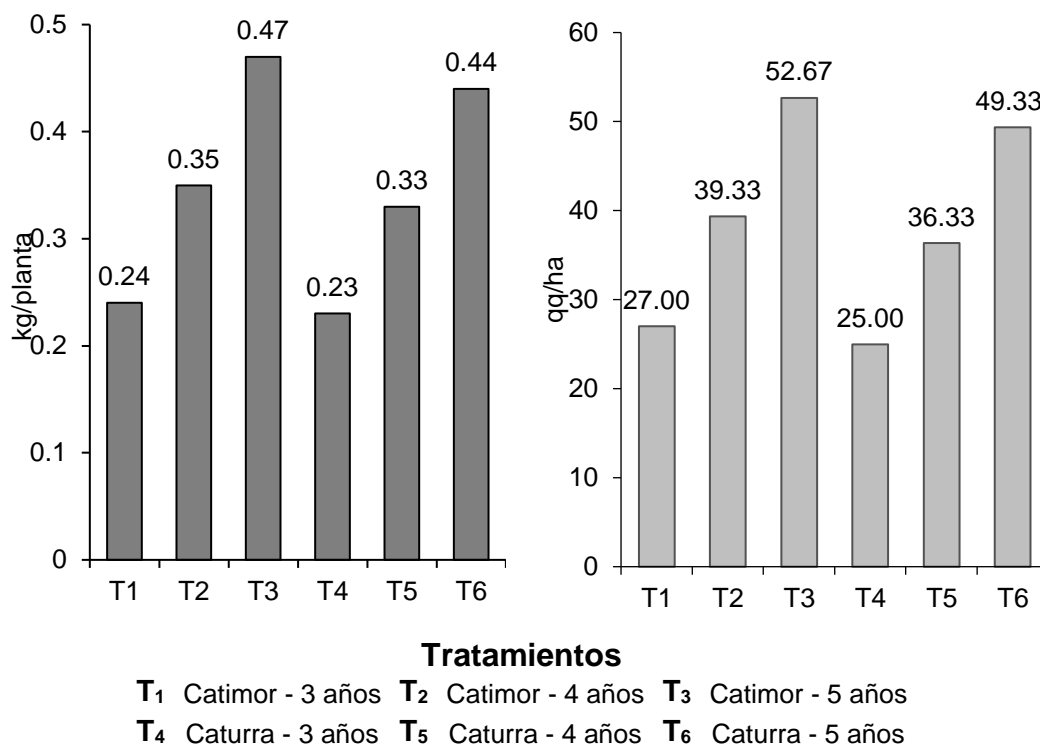
Para obtener cosechas rentables, los suelos deben ser ricos en materia orgánica (2.5 - 2.5 %), con buen suministro de N, P y K (Sánchez 2015). Respecto a las características físicas y químicas de los suelos en estudio, estas presentaron adecuadas condiciones para el cultivo de café, excepto en los promedios de fósforo disponible, que presentaron niveles bajos (Cuadro 20). Estudios realizados por Contreras y Adriazola (2011) concluyeron que la fertilización química y fertilización orgánica (pulpa de café) no establecieron diferencias estadísticas significativas en el rendimiento del café, pero numéricamente la fertilización química se mantuvo primero.

Existen otros factores que reducen la producción del café, entre ellos se encuentran las malezas (competencia por agua, nutrientes y luz) y los problemas fitosanitarios (plagas y enfermedades) (Arcila 2007b).

**Cuadro 28.** Rendimiento del cultivo de café en kg/planta y qq/ha<sup>-1</sup>.

Tratamientos	Descripción	Rendimiento		
		kg/planta	qq/ha <sup>-1</sup>	Sig.
T <sub>3</sub>	Catimor - 5 años	0.47	52.67	a
T <sub>6</sub>	Caturra - 5 años	0.44	49.33	a
T <sub>2</sub>	Catimor - 4 años	0.35	39.33	b
T <sub>5</sub>	Caturra - 4 años	0.33	36.33	b
T <sub>1</sub>	Catimor - 3 años	0.24	27.00	c
T <sub>4</sub>	Caturra - 3 años	0.23	25.00	c

Tratamientos unidos por la misma letra en la columna no existe significancia estadística.



**Figura 21.** Rendimiento del cultivo de café en kg/planta y qq/ha<sup>-1</sup>.

#### 4.8. Análisis de correlación

En el Cuadro 29, se presenta el análisis de correlación, donde se observa que el rendimiento de café está correlacionado positiva y altamente significativa con la edad de la planta, altura de planta, longitud de rama y proyección de la copa más negativa con el K disponible. Asimismo, el diámetro de tallo está correlacionado positiva y altamente con la longitud de rama y proyección de la copa, más significativa con la altura de planta y Mg de la raíz. Mientras que la altura de planta está correlacionada positiva y altamente significativa con el rendimiento y significativa con el Índice de Shannon-Wiener, diámetro de tallo y proyección de la copa. Para la longitud de rama existe una correlación positiva y altamente significativa con el rendimiento, diámetro de tallo y proyección de copa y significativa con el área radicular más negativa con el potasio disponible. El número de ramas está correlacionado positiva y altamente significativa con la

densidad aparente, más negativa con la porosidad total y arcilla. La profundidad de radicular de la planta de café esta correlacionada positiva y altamente significativa con la materia orgánica, nitrógeno, saturación de Al e inversa con la resistencia a la penetración, pH, CIC, Ca foliar, asimismo significativa con Zn foliar y negativa con Mg cambiable y Na raíz. El área radicular presenta una correlación positiva y significativa con la longitud de rama, sin embargo, negativa con el K en la raíz.

**Cuadro 29.** Coeficientes de correlación para el rendimiento y las características biométricas del cafeto.

Parámetros		Correlaciones									
Rendimiento	Edad	K disponible		Altura de planta		Long. Rama		Proyección de la copa			
	0.954**	- 0.629**		0.614**		0.611**		0.721**			
Diámetro de tallo	Altura de planta	Long. Rama		Proyección de la copa		Mg Raíz					
	0.470*	0.599**		0.594**		0.528*					
Altura de planta	Rendimiento	H'		Diámetro tallo		Proyección de la copa					
	0.614**	0.503*		0.470*		0.589*					
Longitud de rama	Rendimiento	K disponible		Diámetro tallo		Área radicular		Proyección de la copa			
	0.611**	- 0.578*		0.599**		0.506*		0.956**			
N.º de ramas	Arcilla	Densidad aparente			Porosidad total						
	- 0.571*	0.661**			- 0.660**						
Profundidad de radicular	R. Penetr.	pH	MO	N	CIC	Ca	Mg	Sat. Al	Ca foliar	Zn foliar	Na raíz
	- 0.717**	-0.763**	0.839**	0.835**	-0.711**	- 0.901**	0.508*	0.816**	-0.598**	0.520*	- 0.567*
Área radicular	Long. Rama					K raíz					
	0.506*					- 0.492*					

(\*\*): significación al 1 %    (\*): Significación al 5 %

Realizado el análisis de regresión lineal múltiple con las variables, se determinó el siguiente modelo matemático: Rendimiento de café = -13.687 + 11.977 edad + 0.008 K disponible + 4.991 proyección de la copa, cuyo análisis

de varianza se presenta en el Cuadro 39 del Anexo, con un coeficiente de determinación de  $r^2 = 0.91$  y un coeficiente de correlación de  $r = 0.96$ .

$$Rto = -13.687 + 11.977 \text{ edad} + 0.008 K \text{ disponible} + 4.991 \text{ proyección de la copa}$$

Alarcón (2016) indica que la edad de la planta es un indicador del rendimiento del café, esto se puede evidenciar en el Cuadro 28, donde los tratamientos T<sub>3</sub> (Catimor 5 - años) con 0.47 kg/planta y 52.67 qq/ha<sup>-1</sup> y T<sub>6</sub> (Caturra - 5 años) con 0.44 kg/planta y 49.33 qq/ha<sup>-1</sup> fueron numérica y estadísticamente superiores a los demás tratamientos.

Sadeghian (2017) señala que el potasio interviene en la formación de los frutos de café, cuando hay deficiencia del potasio se produce una ligera reducción en el tamaño de los frutos. El potasio es el nutriente de mayor absorción por las plantas, siendo superado sólo por el nitrógeno y, a veces por el calcio. Sadeghian *et al.* (2006) reportaron que nitrógeno es el nutriente de mayor concentración (1.87 %) en las almendras de café, seguido del potasio con (1.39 %).

La sombra proyectada por la copa del cafeto mantiene el equilibrio hídrico alrededor de las raíces en épocas de verano, reduce la competencia entre el café y las malezas por los nutrientes, también disminuye la intensidad de la luz solar, favoreciendo a las poblaciones de *Beauveria bassiana* y *Lecanicillium lecanii*, hongos que se desarrollan de forma natural en el suelo y son utilizados para el control de plagas y enfermedades como *Hypothenemus hampei* (broca del café) y *Hemileia vastatrix* (roya amarilla), donde la mayor incidencia se registra en periodo de altas temperaturas, considerados como un factor limitante para la producción de café (Montes *et al.* 2012). La sombra proyectada es proporcional

a la longitud horizontal de las raíces; una buena proporción de raíces es un indicador de la eficiencia en la absorción de agua y nutrientes por la planta.

Por otra parte, del análisis de regresión lineal múltiple con las variables para el diámetro de tallo, se determinó el siguiente modelo matemático: Diámetro de tallo =  $1.984 + 2.507$  proyección de la copa +  $25.345$  Mg raíz -  $0.402$  N foliar, cuyo análisis de varianza se presenta en el (Cuadro 39 del Anexo), con un coeficiente de determinación de  $r^2 = 0.72$  y un coeficiente de correlación de  $r = 0.85$ . Asimismo, se determinó el siguiente modelo matemático para la altura de planta: Altura de planta =  $2.362 + 1.459$  proyección de la copa -  $0.147$  Zn foliar -  $0.021$  arcilla -  $4.623$  Ca raíz -  $0.005$  Fe raíz, cuyo análisis de varianza se presenta en el (Cuadro 40 del Anexo), con un coeficiente de determinación de  $r^2 = 0.93$  y un coeficiente de correlación de  $r = 0.96$ . Para la longitud de la rama más grande el modelo matemático es: Longitud de la rama =  $0.469 + 0.706$  proyección de copa -  $2.044$  Mg foliar, cuyo análisis de varianza se presenta en el (Cuadro 41 del Anexo), con un coeficiente de determinación de  $r^2 = 0.94$  y un coeficiente de correlación de  $r = 0.97$ . El modelo matemático para el número de ramas: Número de ramas =  $- 62.807 + 125.966$  densidad aparente -  $39.351$  proyección de la copa -  $18.182$  k raíz -  $0.180$  Cu raíz, el análisis de varianza se presenta en el (Cuadro 42 del Anexo), con un coeficiente de determinación de  $r^2 = 0.86$  y un coeficiente de correlación de  $r=0.93$ . El siguiente modelo matemático corresponde a la profundidad radicular: Profundidad radicular =  $71.232 - 3.458$  Ca +  $4.139$  P foliar -  $98.320$  Ca foliar -  $0.995$  CIC, el análisis de varianza se presenta en el (Cuadro 42 del Anexo), con un coeficiente de determinación de  $r^2 = 0.94$  y un coeficiente de correlación de  $r = 0.97$ . Para el área radicular: Área radicular =  $0.173 - 0.226$

k raíz + 1.258 Ca foliar, el análisis de varianza se presenta en el (Cuadro 41 del Anexo), con un coeficiente de determinación de  $r^2 = 0.45$  y un coeficiente de correlación de  $r = 0.67$ .

## V. CONCLUSIONES

1. Los suelos estudiados evidenciaron adecuadas condiciones físicas para el cultivo de café, sin embargo, la fertilidad química fue bajo y respecto a las propiedades biológicas, los suelos estuvieron representados por el orden Haplotaxida, Isopoda e Hymenoptera.
2. Con respecto a la profundidad radicular los tratamientos T<sub>6</sub> (Caturra - 5 años), T<sub>4</sub> (Caturra - 3 años), T<sub>1</sub> (Catimor - 3 años) y T<sub>3</sub> (Catimor - 5 años) presentaron la mayor longitud vertical, pero sin diferenciarse estadísticamente entre ellos, mientras que en el área radicular los tratamientos no presentaron significación estadística. Por otro lado, la concentración de elementos en las hojas y raíces del café no presentaron diferencias estadísticas significativas, excepto el Na, Fe y Mn de las raíces, que presentaron diferencias estadísticas significativas.
3. Los tratamientos T<sub>3</sub> (Catimor - 5 años) y T<sub>6</sub> (Caturra - 5 años) presentaron los mejores rendimientos con 52.67 y 49.33 qq/ha<sup>-1</sup>, mientras que los tratamientos T<sub>1</sub> (Catimor - 3 años) y T<sub>4</sub> (Caturra - 3 años) presentaron los más bajos rendimientos con 27 y 25 qq/ha<sup>-1</sup>.
4. Según el análisis de regresión lineal múltiple se determinó el siguiente modelo matemático para el rendimiento de café (qq/ha) = -13.687 + 11.977 edad + 0.008 K disponible + 4.991 área de la proyección de la copa.

## **VI. RECOMENDACIONES**

1. Hacer estudios similares en otros sistemas de producción como cafés convencionales, en diferentes variedades (Costa Rica 95, Gran Colombia, típica, borbón entre otros) y en distintos pisos altitudinales.
2. Realizar evaluaciones en cafetales de 3, 6 y 9 años para mayor diferenciación de los tratamientos.

## VII. BIBLIOGRAFÍA

1. Aguado S, G.; Moreno G, B.; Jiménez F, B.; García M, E y Preciado O, R. 2012. Impacto de los sideróforos microbianos y fitosideróforos en la asimilación de hierro por las plantas: una síntesis. Rev. Fitotec. Mex. 35(1):9-21.
2. Aguilar C, A. 2000. Evaluación de sistemas agroforestales con café asociado con Eucaliptus deglupta o Terminalia ivorensis e implicaciones metodológicas. Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza. Tesis. Magister Scientiae. Turrialba - Colombia. 87 p.
3. Alarcón A, G. 2016. Comportamiento de tres variedades de café (*Coffea arabica* L.) en el valle del Perene, Junín – Perú. Tesis. Ing. Agrónomo. Universidad Nacional Agraria la Molina. Perú. 120 p.
4. Andrades, M y Martínez, M. 2014. Fertilidad del suelo y parámetros que la definen. Recurso electrónico/ 3ª ed. Universidad de la Rioja. Logroño, España. 29 p.
5. Ángel C, MC.; López B, W y Zavala M, J. 2017. Diagnostico participativo de la acidez en suelos cafetaleros de la microcuenca La Suiza, municipio de Montecristo, Chiapas. In Martínez H, J; Ramírez G, MA y Cámara C, J: Seguridad Alimentaria: Aportaciones Científicas y Agrotecnológicas. Tabasco, México. Pp. 398-404.
6. Arcila P, J. 1992. Factores que limitan el desarrollo de las raíces del café. Avances técnicos N° 176. Cenicafe. Pp. 215-222.

7. Arcila P, J. 2007a. Crecimiento y desarrollo de la planta. *In* Farfán V, F.; Moreno B, A.; Salazar G, L y Hincapié G, E: Sistemas de producción de café en Colombia. Chinchana - Colombia. Pp. 21-60.
8. Arcila P, J. 2007b. Factores que determinan la productividad. *In* Farfán V, F.; Moreno B, A.; Salazar G, L y Hincapié G, E: Sistemas de producción de café en Colombia. Chinchana - Colombia. Pp. 61-86.
9. Balladares V, D.; Calero M, J y Aguilar B, V. 2005. Efecto de la sombra y fertilización sobre el crecimiento, estructura productiva, rendimiento y calidad del café (*Coffea arabica* L.) vr. Costa Rica 95. Trabajo de Diploma. Facultad de Agronomía - Universidad Nacional Agraria. Managua - Nicaragua. 82 p.
10. Barreto S, L y León P, J. 2005. Masa total y contenido de nutrientes en raíces finas de ecosistemas forestales (*pinus patula schltl* y *cham cupressus lusitanica mill* y *quercus humboldtii bonpl.*) de piedras blancas, Antioquia - Colombia. Rev. Fac. Nac. Agro. Medellín. 58(2):2907-2929.
11. Benegas R, K. 2009. Identificación de las fuentes de variación que tienen efecto sobre la calidad de café (*Coffea arabica* L.) en los municipios de El Paraíso y Alauca, Honduras. Tesis Maestría. Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza. Turrialba - Costa Rica. 74 p.
12. Berlingeri, C.; Alvarado, C.; Silva, R.; Marín, C.; La Cruz, L.; Durán, D., Medina, A y Bustamante, J. 2007. Evaluación agronómica de 18

líneas de café en la localidad de La Vitu, Estado Trujillo, Venezuela.  
Bioagro. 19(1):27-33.

13. Bernal, A.; Hernández, A.; Mesa, M.; Rodríguez, O.; González, P y Reyes, R. 2015. Características de los suelos y sus factores limitantes de la región Murgas, provincial de La Habana. Cultivos Tropicales. 36(2):30-40.
14. Bernier V, R y Alfaro V, M. 2006. Acidez de los suelos y efectos del encalado. [En línea]: Biblioteca Inia (<http://biblioteca.inia.cl/medios/biblioteca/boletines/NR33824.pdf>, revisado el 22 de setiembre del 2020).
15. Brown G, G.; Fragoso C.; Barois I.; Roas P.; Patrón J.; Bueno J.; Moreno A.; Lavelle P.; Ordaz V y Rodríguez C. 2001. Diversidad y rol funcional de la macrofauna edáfica en los ecosistemas tropicales mexicanos. Acta Zoológica Mexicana. Número Especial 1:79-110.
16. Box J, E. 1996. Modern methods for root investigations. *In*: Plant Roots: the Hidden Half. Eds Y Waisel A Eshel and U Kafkafi. Marcel Dekker, New York, USA.
17. Buenaventura S, C y Castaño C, J. 2002. Influencia de la altitud en la calidad de muestras de café procedentes del ecotopo 206B en Colombia. Cenicafé. 53(2):119-131.
18. Cabrera D, G. 2014. Manual práctico sobre la macrofauna edáfica como indicador biológico de la calidad del suelo, según resultados en cuba. Ruffor Fundación. Cuba. 34 p.

19. Cabrera, G. 2012. La macrofauna edáfica como indicador biológico del estado de conservación/perturbación del suelo. Resultados obtenidos en Cuba. *Pastos y forrajes*. 35(4):349-364.
20. Cardona C, D y Sadeghian K, S. 2005a. Aporte de material orgánico y nutrientes en cafetales al sol y bajo sombrío de Guamo. *Cenicafé - Avances Técnicos*. N° 334. 8 p.
21. Cardona C, D y Sadeghian K, S. 2005b. Evaluación de propiedades físicas y químicas de los suelos establecidos con café bajo sombra y a plena exposición solar. *Cenicafé*. 56(4):348-364.
22. Carmo, DL.; Nannetti, DC.; Días Júnior, MS.; Lacerda, TM.; Nannetti, AN y Manuel, L. 2014. Chemical and physical attributes of a latosol and coffee crop nutrition in agroforestry and conventional management systems. *Coffee Science*. 9(1):122-131.
23. Casierra P, F y Aguilar A, O. 2007. Estrés por aluminio en plantas: reacciones en el suelo, síntomas en vegetales y posibilidades de corrección. *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas*. 1(2):246-257.
24. Casierra P, F y Poveda J. 2005. La toxicidad por exceso de Mn y Zn disminuye la producción de materia seca, los pigmentos foliares y la calidad del fruto en fresa (*Fragaria sp. cv. Camarosa*). *Agronomía Colombiana*. 23(2):283-289.
25. Castañeda, E. 1997. Manual técnico cafetalero. Ingeniería para el Desarrollo. Imp. Empresa Grafica Libertad. S.A. Lima. Perú. 162 p.
26. Castillo C, C. 2005. Selección y calibración de indicadores locales y técnico para evaluar la degradación de los suelos laderas, en la

- microcuenca Cuscamá el Tuma - La Dalia Matagalpa. Trabajo de diploma. Universidad Nacional Agraria. Managua-Nicaragua. 106 p.
27. Castro, P.; Contreras, Y.; Laca, D y Nakamatsu, K. 2004. Café de especialidad: Alternativa para el sector cafetalero peruano. Programa de Magister en Administración. Perú. Año 9, n°17. Pp. 61-84.
28. CIAT/TSBF-LAC (Centro Internacional de Agricultura Tropical / Instituto de Biología y Fertilidad de Suelos Tropicales - Grupo de América Latina). 2015. Protocolo de muestreo para la macrofauna del suelo. [En línea]: (<https://suelosandinos.files.wordpress.com/2015/09/ciat-tsbf-lac-procedimiento-muestreo-macrofauna-suelo-jun-.pdf>, revisado el 26 de febrero del 2016).
29. CICAFFE (Centro en Investigaciones en Café). 2011. Guía técnica para el cultivo de café. Instituto del café de Costa Rica. 1<sup>ra</sup> ed. Heredia - Costa Rica. 72 p.
30. Céspedes L, C. 2005. La agricultura orgánica: principios y prácticas de producción. Ministerio de Agricultura – Instituto de Investigaciones Agropecuarias – Centro Regional de Investigación de Quilamapu. Chile. Boletín Inia – N° 131. 116 p.
31. Contreras P, E. 2009. Efecto de la pulpa de café y la fertilización química en el rendimiento y en la macrofauna edáfica del cultivo de café (*Coffea arabica* L.). Tesis. Ing. Agrónomo. Universidad Nacional Agraria de la Selva. Tingo María - Perú. 104 p.

32. Contreras P, E y Adiazola D, J. 2011. Efecto de la pulpa de café y la fertilización química en el rendimiento y en la macrofauna edáfica del cultivo de café (*Coffea arabica* L.). *Investigación y Amazonia*. 1(2):53-58.
33. Coraspe L, H.; Muraoka, T.; Ide F, V.; Contreras E, F y Ocheuze T, P. 2009. Absorción de formas de nitrógeno amoniacal y nítrica por plantas de papa en la producción de tubérculo-semilla. *Agronomía Trop*. 59(1):45-58.
34. Coronel B, D. 2019. Identificación de variedades de café en las parcelas agroforestales certificadas en Jaén y San Ignacio. Tesis. Ing. Forestal y Ambiental. Universidad Nacional de Jaén. Perú. 158 p.
35. Cortés, C.; Camacho T, J y Leiva, F. 2013. Análisis multivariado del comportamiento espacial y temporal de la resistencia del suelo a la penetración. *Acta Agronómica*. 62(3):268-278.
36. Delgado, G.; Burbano, A y Silva P, A. 2010. Evaluación de la macrofauna del suelo asociada a diferentes sistemas con café *Coffea arabica* L. *Revista de Ciencias Agrícolas*. 28(1):91-106.
37. Díaz V, C y Carmen W, M. 2017. Línea de base del sector café en el Perú. [En línea]: (<https://camcafeperu.com.pe/admin/recursos/publicaciones/Linea-base-del-sector-cafe-en-Peru.pdf>, revisado el 07 de setiembre del 2020).
38. Ernst, W.H. 1996. Schwermetalle. Pp. 191-220. *En*: Brunold, Ch., A. Rüegesegger y R. Brändle (eds). *Stress bei Pflanzen*. UTB für Wissenschaft. Verlag Paul Haupt, Stuttgart.

39. FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación). 2009. Guía para la descripción de suelos. [En Línea]: Fao (<http://www.fao.org/3/a-a0541s.pdf>, revisado el 25 de febrero del 2020).
40. Farfán V, F y Urrego, J. B. 2007. Descomposición de la hojarasca y liberación de nutrientes de *Coffea arabica* L., *Cordia alliodora*, *Pinus oocarpa* y *Eucalyptus grandis*, en sistemas agroforestales con café. *Cenicafé*. 58(1):20-39.
41. Fernández T, I.; Castellanos G, L.; Cairo C, P.; Rajadel A, N y De Melo P, R. 2015. Macrofauna del suelo en cuatro fincas de conversión hacia la conversión hacia la producción agroecológica en el Municipio de Cruces, Cuba. *Centro Agrícola*. 42(1):43-52.
42. Ferreras, L.; Magra, G.; Besson, P.; Kovalevsky, E y García, F. 2007. Indicadores de calidad física en suelos de la región Pampeana Norte de Argentina bajo siembra directa. *Cl. Suelo*. 25(2):159-172.
43. Ferreyra E, R y Selles V, G. 2013. Manual de riego para especies frutales. [En línea]: Biblioteca INIA (<http://biblioteca.inia.cl/medios/biblioteca/boletines/NR39147.pdf>, revisado el 21 de setiembre del 2020).
44. Figueroa, R., Fischersworing, B y Roskamp, R. 1996. Guía para la caficultura ecológica. Novella Publigráf S.R.L. Lima, Perú. 171 p.
45. Flores D, L y Alcalá M, J. 2010. Manual de procedimientos analíticos. [En línea]: Instituto de Geología, Universidad Nacional Autónoma de México (<https://www.geologia.unam.mx/igl/deptos/edafo/lfs/MA>

NUAL%20DEL%20LABORATORIO%20DE%20FISICA%20DE%20SUELOS1.pdf, revisado el 10 de setiembre del 2020).

46. Gallegos V, C.; Olivares S, E.; Vázquez A, R y Zavala G, F. 2000. Absorción de nitrato y amonio por plantas de nopal en hidroponía. *Terra Latinoamericana*. 18(2):133-139.
47. Garrido V, S. 1994. Interpretación de análisis de suelos. Guía práctica para muestrear los suelos e interpretar sus análisis. Madrid - España. 40 p.
48. George, A. 2006. Estudio comparativo de indicadores de calidad de suelo en fincas de café orgánico y convencional en Turrialba, Costa Rica. Tesis. Magister Scientiae. Agricultura Ecológica. Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (Catie). Costa Rica. 118 p.
49. Gil C, A y Díaz M, L. 2016. Evaluación de tipos de contenedores sobre el crecimiento radical de café (*Coffea arabica* L. cv. Castillo) en etapa de vivero. *Revista Colombiana Ciencias Hortícolas*. 10(1):125-136.
50. Gonzáles B, J.; Gonzáles C, G y Chávez R, E. 2012. Porosidad del suelo en tres superficies típicas de la Cuenca Alta del Rio Nazas. *Tecnología y Ciencia del Agua*. 3(1):21-32.
51. Goykovic C, V y Saavedra D, G. 2007. Algunos efectos de la salinidad en el cultivo del tomate y prácticas agronómicas de su manejo. *IDISEA (Chile)*. 25(3):47-58.
52. Hall, JL. 2002. Cellular mechanisms for heavy metal detoxification and tolerance. *Journal of Experimental Botany*. 53 (366):1-11.

53. Harmand, JM.; Ávila, H.; Oliver, R.; Saint-André, L y Dambrine, E. 2010. The impact of kaolinite and oxi-hydroxides on nitrate adsorption in deep layers of a Costarican Acrisol under coffee cultivation. *Geoderma* 158(3-4):216-224.
54. Henao T, M C y Hernández G, E. 2002. Disponibilidad de potasio en suelos derivados de cenizas volcánicas y su relación con la nutrición del café en la etapa vegetativa. *Cenicafé*. 53(4):293-305.
55. Huamán S, MA y Barón S, A. 2015. Efecto de los sistemas productivos de café (*Coffea arabica* L.) orgánico y convencional sobre los macroinvertebrados edáficos en el caserío San Vicente, distrito de Jepelacio - San Martín 2014. Tesis Ing. Ambiental. Universidad Nacional de San Martín, Tarapoto. Perú. 117 p.
56. Huarauya A, MM. 2014. Determinación de macrofauna en suelos de cafetales (*Coffea arabica* L.) en Santa Rosa Tealera, Distrito Hermilio Valdizán. Tesis Ing. en Recursos Naturales renovables mención conservación de suelos y agua. Universidad Nacional Agraria de la Selva. Tingo María - Perú. 94 p.
57. INTAGRI (Instituto para la Innovación Tecnológica en la Agricultura). 2007. Propiedades físicas del suelo y el crecimiento de las plantas. [En línea]: Intagri (<https://www.intagri.com/articulos/suelos/propiedades-fisicas-del-suelo-y-el-crecimiento-de-las-plantas>, revisado e 22 de setiembre del 2020).

58. INTAGRI (Instituto para la Innovación Tecnológica en la Agricultura). 2015. La Capacidad de Intercambio Catiónico del Suelo. Serie Suelos. Núm. 09. Artículos Técnicos de Intagri. 3 p
59. Jaramillo J, D. 2002. Introducción a la ciencia del suelo. Facultad de ciencias. Universidad Nacional de Colombia. 619 p.
60. Jiménez, J.; Decaëns, T.; Thomas, R y Lavelle, P. 2003. La macrofauna del suelo: un recurso natural aprovechable pero poco conocido. [En Línea]: Ciat ([http://ciat-library.ciat.cgiar.org/articulos\\_ciat/tsbf/pdf/arado\\_natural\\_cap1.pdf](http://ciat-library.ciat.cgiar.org/articulos_ciat/tsbf/pdf/arado_natural_cap1.pdf), revisado el 23 de setiembre del 2020).
61. Juan G, R. 1970. Metodología para el estudio de la distribución y comportamiento el sistema radicular de los cítricos. [En Línea]: Cambio Climático, Agua y Riego (<http://www.aguayriego.com/2011/09/metodologia-para-el-estudio-de-la-distribucion-y-comportamiento-del-sistema-radicular-de-los-citricos/>, revisado el 07 de setiembre del 2017).
62. Julca O, A.; Alarcón A, G.; Alvarado H, L.; Borjas V, R y Castro C, V. 2018. Comportamiento de tres cultivares de café (Catimor, Colombia y Costa rica 95) en el valle del Perené, Junín, Perú. Chilean J. Agric. Anim. Sci. 34(3):205-215.
63. Julca O, A.; Meneses F, L.; Blas S, R y Bello A, S. 2006. Materia orgánica, importancia y experiencias de su uso en la agricultura. IDESIA (Chile). 24(1):49-61.

64. Kafkafi, U. 2008. Functions of the root system. Pp. 13-40. *En*: Raviv, M y J.H. Lieth (eds.). *Soilless culture: theory and practice*. Elsevier, Amsterdam, The Netherlands.
65. Kochian, L, V. 1995. Cellular mechanism of aluminium toxicity and resistance in plants. *Annu. Rev. Plant Physiol. Plant Mol. Biol.* 46,237-260.
66. Lastra C, O. 2019. Sodio en plantas C4. Departamento de Química Inorgánica y Analítica. Facultad de Ciencias Químicas. Universidad de Chile. Casilla 233. Santiago de Chile, Chile. 6 p.
67. Laviola, BG.; Martínez, HE.; de Souza, RB y Álvarez V, VH. 2006. Dinâmica de N e K em folhas, flores e frutos de *Cafeeiro arábico* em três níveis de adubação. *Biosci. J., Uberlândia.* 22(3):33-47.
68. Lince S, LA y Sadeghian K, S. 2016. Producción de café (*Coffea arabica* L.) en función de las propiedades del suelo, en dos localidades de Quindío, Colombia. *Revista Investigación Agraria y Ambiental.* 7(1):71-82.
69. Llanco A, JE. 2014. Tipología de manejo agronómico en el crecimiento, productividad y calidad física de café (*Coffea arabica* L. var. Catimor) en el valle de Santa Cruz, distrito de Río Tambo, provincia de Satipo y región Junín. Tesis Ing. Agrónomo. Universidad Nacional del Centro del Perú. Satipo, Perú. 74 p.
70. López B, W.; Castro M, I.; Salinas C, E.; Reynoso S, R y López M, J. 2016. Propiedades de los suelos cafetaleros en la Reserva de la Biósfera El Triunfo, Chiapas, México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas.* 7(3):607-618.

71. López B, W.; Reynoso S, R.; López M, J.; Villar S, B.; Camas G, R y García S, J. 2019. Caracterización físico-química de suelos cultivados de maíz en Villaflores, Chiapas. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*. 10(4):897-910.
72. López D, L. 2012. Producción de raíces finas y micorrización en CAFÉ (*Coffea arabica* L.) cultivado bajo sistema convencional y orgánico en Turrialba, Costa Rica. Tesis Lic. Recursos Naturales y Ambiente. Universidad Nacional de Agricultura. Honduras. 81 p.
73. Luna R, F.; López M, J y Larios G, R. 2012. Sistemas de manejo en café (*Coffea arabica* L.) y efecto de la fertilidad del suelo y el rendimiento de café oro, Masatepe, Masaya. *La Calera Revista Científica*. 12(18):29-36.
74. Marcelo L, W.; Nakamine H, E.; Palomino R, F y Rodríguez M, G. 2018. Planeamiento estratégico para la industria peruana del café. Tesis. M Sc. Administración Estratégica de Empresas. Pontificia Universidad Católica del Perú. 200 p.
75. Márquez R, F.; Julca O, A; Canto S, M.; Soplín V, H.; Vargas W, S y Huerta F, P. 2016. Sustentabilidad ambiental en fincas cafetaleras después de un proceso de certificación orgánica en la convención (Cusco, Perú). *Ecología aplicada*. 15(2):125-132.
76. Marín G, T.; Gómez M, F C.; Aguilar-R., N.; Murguía G, J.; Trejo T, L.; Pastelín S, M C y Castañeda C, O. 2018. Composición bioactiva de hojas de café durante un ciclo anual. *Rev. Fitotec. Mex.* 41(4):365-372.

77. Mikkelsen, R. 2010. Fuentes de magnesio. [En línea]: [http://www.ipni.net/publication/ia-lahp.nsf/0/47833649504C3064852579A0006A1A38/\\$FILE/3.%20Fuentes%20de%20Magnesio.pdf](http://www.ipni.net/publication/ia-lahp.nsf/0/47833649504C3064852579A0006A1A38/$FILE/3.%20Fuentes%20de%20Magnesio.pdf), revisado el 18 de marzo del 2021).
78. MINAGRI (Ministerio de Agricultura y Riego). 2018. Plan nacional de acción del café peruano. [En línea]: (<https://www.minagri.gob.pe/portal/images/cafe/PlanCafe2018.pdf>, revisado el 07 de setiembre del 2020).
79. Montes R, C.; Armando P, O y Amilcar C, R. 2012. Infestación e incidencia de broca, roya y mancha de hierro en cultivo de café del departamento del cauca. *Biotecnología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial*. 10(1):98-108.
80. Navarro, G y Navarro, S. 2000. Química agrícola/ química del suelo y de los nutrientes esenciales para las plantas. Tercera edición. Editorial Mundo Prensa. Madrid - España. 491 p.
81. Nahuamel J, E. 2018. Factores competitivos para el desarrollo de la caficultura. *Pensamiento Crítico*. Perú. 23(2):97-114.
82. Noriega A, G.; Cárcamo R, B.; Gómez C, M A.; Schwentesius R, R.; Cruz H, S.; Leyva B, J.; García D, E.; López R, U I y Martínez H, A. 2014. Intensificación de la producción en la agricultura orgánica: caso café. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*. 5(1):163-169.
83. Ñique A, M. 2010. Biodiversidad: Clasificación y Cuantificación. Universidad Nacional Agraria de la Selva. Manual. Perú. 17 p.

84. Núñez, P A.; Pimentel, A.; Almonte, I.; Sotomayor R, D.; Martínez, N.; Pérez, A y Céspedes, C M. 2011. Soil fertility evaluation of coffee (*Coffea* spp.) production systems and management recommendations for the Barahona province, Dominican Republic. *Journal of soil science and plant nutrition*. 11(1):127-140.
85. Orozco C, A.; Valverde F, M.; Martines T, R.; Chávez B, C y Benavides H, R. 2016. Propiedades físicas, químicas y biológicas de un suelo con biofertilización cultivado con manzano. *Terra Latinoamericana*. 34(4):441-456.
86. Ortiz E, M. E.; Zapata H, R.D.; Sadeghian K, S. y Franco A, H. F. 2004. Aluminio intercambiable en suelos con propiedades ándicas y su relación con la toxicidad. *Cenicafé*. 55(2):101-110.
87. Paz, I.; Sánchez, M y Sadeghian, S. 2006. Relación entre dos sistemas de sombrero de café y algunas propiedades del suelo en la meseta de Popayán, Colombia. *Acta Agronómica*. 55(4):1-6.
88. Peralta A, J M y Carrasco J, J. 1990. Compactación de los suelos frutícolas y hortícolas. [En Línea]: Biblioteca Inia. (<http://biblioteca.inia.cl/medios/biblioteca/IPA/NR08876.pdf>, revisado el 22 de setiembre del 2020).
89. Perdomo, C.; Barbazán, M y Durán, J. sf. Nitrógeno. [En Línea]: FAGRO (<http://www.fagro.edu.uy/~fertilidad/publica/Tomo%20N.pdf>, revisado el 22 de setiembre del 2020).
90. Pla, L. 2006. Biodiversidad: inferencia basada en el índice de shannon y la riqueza. *Interciencia*. 31(8):583-590.

91. Puerta, G. 1998. Calidad de las variedades de *Coffea arabica* L. cultivadas en Colombia. *Cenicafé*. 49(4):265-278.
92. Quinto M, H.; Moreno H, H.; Caicedo M, H y Pérez L, M. 2016. Biomasa de raíces finas y fertilidad del suelo en bosques pluviales tropicales del pacífico colombiano. *Colombia Forestal*. 19(1):53-66.
93. Quispe C, A. 2013. Propiedades biológicas y físicas del suelo bajo diferentes sistemas de manejo en el cultivo de café (*Coffea arabica* L.). Tesis. Ing. Recursos Naturales Renovables. Universidad Nacional Agraria de la Selva. Tingo María-Perú. 118 p.
94. Ramos A, D y Terry A, E. 2014. Generalidades de los abonos orgánicos: importancia del bocashi como alternativa nutricional para suelos y plantas. *Cultivos Tropicales*. 35(4):52-59.
95. Rendón S, J y Giraldo H, A. 2019. Distribución de raíces en café variedad Castillo bajo dos arreglos espaciales. *Cenicafé*. 70(1):7-17.
96. Reyes R, W. 2010. Evaluación de la susceptibilidad a la compactación en cuatro series de suelo bajo uso agrícola en Venezuela. *Bioagro*. 22(1):29-36.
97. Rivera M, Y.; Moreno C, L.; Herrera C, M y Romero A, H. M. 2016. La toxicidad por aluminio ( $Al^{+3}$ ) como limitante del crecimiento y la productividad agrícola: el caso de la palma de aceite. *Revista Palmas*. 37(1):11-23.
98. Rodríguez S, A.; Cristóbal A, D.; Álvarez S, E y Uribe G, M. 2016. Indicadores de calidad de un suelo para la producción de maíz bajo sistemas

- agroforestal y monocultivo. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*. (16):263-3275.
99. Rodríguez S, M y Flórez R, V. 2004. Elementos esenciales y benéficos. Nociones básicas del fertirriego. Facultad de Agronomía, Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá. Pp. 25-36.
100. Rodríguez S, N.; Ruz J, E y Chavarría R, J. 1993. Detección y corrección de la acidez de los suelos. [En Línea]: (<https://biblioteca.inia.cl/bitstream/handle/123456789/35069/NR15633.pdf?sequence=1>, revisado el 18 de marzo del 2021).
101. Ronchi, CP.; de Sousa Júnior, JM.; de Almeida, WL.; Souza, DS.; Silva, NO.; de Oliveira, LB; de Moura Guerra, AMN y Ferreira, PA. 2015. Morfología radicular de cultivares de café arabica submetidas a diferentes arranjos espaciais. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*. 50(3):187-195.
102. Rosas A, J.; Escamilla P, E y Ruiz R, O. 2008. Relación de los nutrimentos del suelo con las Características físicas y sensoriales del café orgánico. *Tierra Latinoamericana*. 26(4):375-383.
103. Rucks, L.; García, F.; Kaplan, A.; Ponce De León, J y Hill, M. 2004. Propiedades físicas del suelo. Universidad de la República. Uruguay. 68 p.
104. Salamanca J, A y Sadeghian K, S. 2005. Densidad aparente y su relación con otras propiedades en suelos de la zona cafetalera colombiana. *Centro nacional de investigación de café. Cenicafé*. 56(4):381-397.

105. Sadeghian K, S. 2016. La acidez del suelo una limitante común para la producción de café. *Cenicafé - Avances Técnicos* N°. 466. 12 p.
106. Sadeghian K, S. 2017. Síntomas visuales de deficiencias nutricionales en café: diagnóstico y manejo. *Cenicafé - Avances técnicos*. 12 p.
107. Sadeghian K, S.; Mejia M, B y Arcila P, J. 2006. Composición elemental de frutos de café y extracción de nutrientes por la cosecha en la zona cafetera de Colombia. *Cenicafé*. 57(4):251-261.
108. Sadeghian K, S y Salamanca J, A. 2015. Micronutrientes en frutos y hojas de café. *Cenicafé*. Colombia. 66 (2):73-87.
109. Sadeghian K, S y Zapata H, RD. 2012. Propiedades relacionadas con la adsorción de cationes intercambiables en algunos suelos de la zona cafetera de Colombia. *Cenicafé*. 63(2):79-89.
110. Sánchez E, J. 2015. Pan de manejo de café en el ámbito de VRAEN. Perú. 68 p.
111. Salazar A, J N.; Orozco C, F J y Clavijo P, J F. 1988. Características morfológicas; productivas y componentes del rendimiento de dos variedades de café: Colombia y Caturra. *Cenicafé*. 39(2):43-60.
112. Silva P, A.; Colmenares P, C y Álvarez A, J. 2017. Análisis multivariado de la fertilidad de los suelos en sistemas de café orgánico en Puente Abadía Villavicencio. *U.D.C.A Act. & Div. Cient.* 20(2):289-298.
113. Soto, G. 2003. *Agricultura Orgánica: Una herramienta para el desarrollo rural sostenible y la reducción de la pobreza*. Ministerio de Agricultura de Costa Rica. 120 p.

114. Smith, T y Smith, R. 2007. Ecología general. Edt. Perarson Educación. Madrid - España. 776 p.
115. Trinidad S, A y Velasco V, J. 2016. Importancia de la materia orgánica en el suelo. *Agroproductividad*. México. 9(8):52-58.
116. Toledo, M. 2016. Manejo de suelos ácidos de las zonas altas de Honduras: conceptos y métodos. [En Línea]: Repositorio iica (<https://repositorio.iica.int/bitstream/handle/11324/3108/BVE17069071e.pdf;jsessionid=D0D30D3539D3DCFAE004BEB0E834CB3D?sequence=1>, revisado el 22 de setiembre del 2020).
117. Torella, J.; Garuzzo, R y Faita, E. 2007. Efecto del encalado sobre las propiedades químicas del suelo y la germinación del trébol rojo (*Trifolium pratense*). *Informaciones Agronómicas* nº 36. Pp. 13-16.
118. USDA (Departamento de Agricultura de los Estados Unidos de Norteamérica). 1999. Guía para la evaluación de la calidad y salud del suelo. Instituto de calidad del suelo. EE. UU. 88 p.
119. Vílchez P, N.; Yalta M, J y Carril F, V. 2019. Análisis comparativo de suelos de cinco distritos de la cuenca Chinchipe y su influencia en la fertilidad del cultivo de café (*Coffea arabica* L.). *Pakamuros*. Perú. Año 7, Número 1. Pp. 91-100.
120. Villa C, M.; Catalán V, E A.; Inzunza I, M A y Ulery, A L. 2006. Absorción y traslocación de sodio y cloro en plantas de chile fertilizadas con nitrógeno y crecidas con estrés salino. *Rev. Fitotec. Mex.* 29(1):79-88.

121. Welch, R M y Shuman, L. 1995. Micronutrient Nutrition of Plants, Critical Reviews in Plant. Sciences. 14(1):49-82.
122. Wolff, M y Ovalle, C. 2016. Importancia de la materia orgánica del suelo. [En Línea]: Inia (<http://biblioteca.inia.cl/medios/biblioteca/informativos/NR40548.pdf>, revisado el 22 de setiembre del 2020).
123. Wu, H. 2018. Plant salt tolerance and Na<sup>+</sup> sensing and transport. Crop J. 6:215-225.
124. Zamora, L. 1998. Informe Anual de Labores 1997/Pr. Instituto del Café de Costa Rica. MBA. ICAFE - CICAFFE. Unidad Producción Agrícola. Heredia, Costa Rica. 254 p.
125. Zelaya U, J y Sotelo F, C. 2000. Manejo de la fertilización orgánica e inorgánica en el cultivo del café (*Coffea arabica* L.) en dos años consecutivos (1988/1999). Tesis Ing. Agrónomo. UNA. Nicaragua. 50 p.

## VIII. ANEXO



**Figura 22.** Identificación de tratamientos



**Figura 23.** Calicata del tratamiento T<sub>1</sub> (Catimor - 3 años) R1



**Figura 24.** Calicata del tratamiento T<sub>2</sub> (Catimor - 4 años) R3



**Figura 25.** Calicata del tratamiento T<sub>3</sub> (Catimor - 5 años) R3



**Figura 26.** Calicata del tratamiento T<sub>4</sub> (Caturra - 3 años) R1



**Figura 27.** Distribución radicular de T<sub>4</sub> (Caturra - 3 años) R3



**Figura 28.** Profundidad y área radicular del tratamiento T<sub>3</sub> (Catimor - 5 años)

R2.

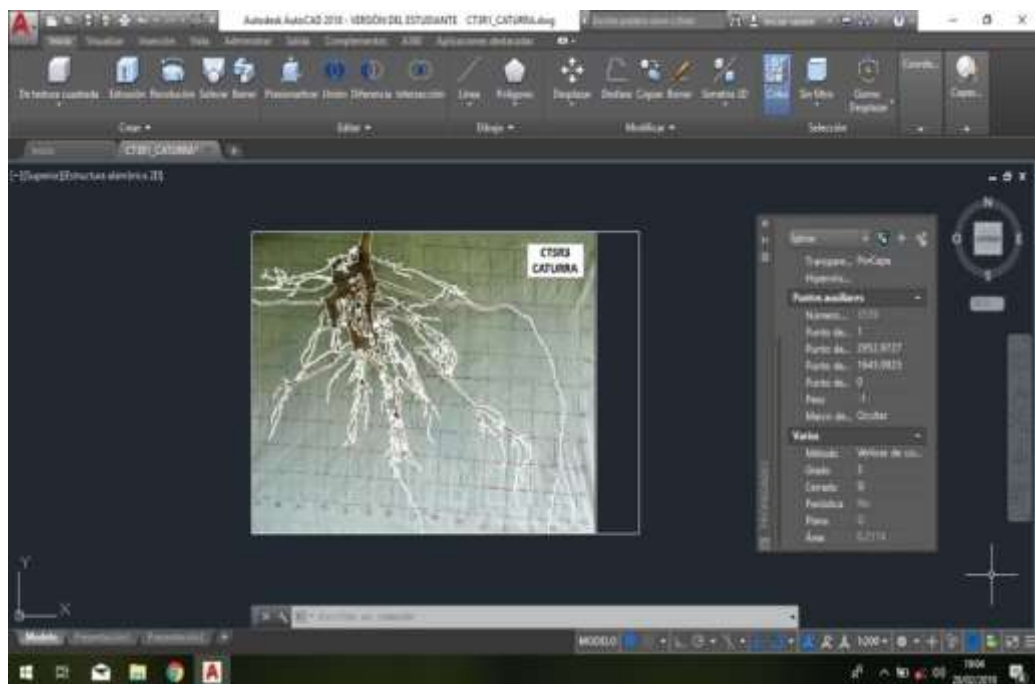


**Figura 29.** Profundidad y área radicular del tratamiento T<sub>6</sub> (Caturra - 5 años)

R3.



**Figura 30.** Distribución de las raíces en el plano cartesiano  $T_3$  (Catimor - 5 años) R2.



**Figura 31.** Digitalización de las raíces.



**Figura 32.** Proyección de la copa



**Figura 33.** Sistema agroforestal



# UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA

AV. UNIVERSITARIA S/N - TINGO MARIA - CELULAR 941531359

Facultad de Agronomía - Laboratorio de Análisis de Suelos

analisisdesuelos@unaselva.edu.pe



## ANÁLISIS DE SUELOS

SOLICITANTE		SELENI VISLAO BENAVIDES										PROCEDENCIA			MOYOBAMBA - SAN MARTIN									
N°	COD. LAB.	DATOS			ANÁLISIS MECÁNICO			pH	M.O.	N	P	K	CIC	CAMBIABLES Cmol(±)/kg										
		SECTOR	CULTIVO	CODIGO DE MUESTRA	Arena %	Arcilla %	Limo %							Textura	Ca	Mg	K	Na	Al	H	CICe	% Sac. Camb.	% Ac. Camb.	% Sat. Al
1	S2001	SAN MIGUEL	CAFÉ CATIMOR 3 AÑOS	CR3-R1	31.2	44.4	24.36	Arcilloso	4.90	3.61	0.16	1.43	130.44	---	4.67	0.76	---	---	3.60	0.80	9.83	55.24	44.76	36.62
2	S2002	SAN MIGUEL	CAFÉ CATIMOR 3 AÑOS	CR3-R2	35.2	36.4	28.4	Franco Arcilloso	4.62	3.75	0.17	0.97	156.43	---	3.23	0.53	---	---	6.70	0.70	11.16	33.66	66.34	60.06
3	S2003	SAN MIGUEL	CAFÉ CATIMOR 3 AÑOS	CR3-R3	17.2	50.4	32.4	Arcilloso	5.40	3.82	0.17	1.05	122.20	---	3.11	0.65	---	---	2.60	0.90	7.26	51.79	48.21	35.81
4	S2004	SAN MIGUEL	CAFÉ CATIMOR 4 AÑOS	CR4-R1	29.2	26.4	44.4	Franco	5.74	1.77	0.08	8.30	130.44	15.15	9.67	1.19	0.24	4.04	---	---	---	100.00	0.00	0.00
5	S2005	SAN MIGUEL	CAFÉ CATIMOR 4 AÑOS	CR4-R2	15.2	46.4	38.4	Arcilloso	5.62	1.98	0.09	0.89	188.92	13.68	9.22	1.07	0.53	2.86	---	---	---	100.00	0.00	0.00
6	S2006	SAN MIGUEL	CAFÉ CATIMOR 4 AÑOS	CR4-R3	31.2	32.4	36.4	Franco Arcilloso	6.10	1.84	0.08	4.98	131.94	13.12	8.81	1.45	0.42	2.44	---	---	---	100.00	0.00	0.00
7	S2007	SAN MIGUEL	CAFÉ CATIMOR 5 AÑOS	CR5-R1	33.2	32.4	34.4	Franco Arcilloso	4.80	3.89	0.17	0.82	77.97	---	3.31	0.89	---	---	6.70	0.80	11.70	35.90	64.10	57.26
8	S2008	SAN MIGUEL	CAFÉ CATIMOR 5 AÑOS	CR5-R2	21.2	42.4	36.4	Arcilloso	5.17	3.68	0.17	1.36	132.44	---	4.86	0.53	---	---	7.60	0.50	13.49	39.96	60.04	56.34
9	S2009	SAN MIGUEL	CAFÉ CATIMOR 5 AÑOS	CR5-R3	33.2	34.4	32.4	Franco Arcilloso	4.52	3.82	0.17	1.82	61.97	---	4.19	0.35	---	---	5.20	0.20	9.94	45.67	54.33	52.31

MUESTREADO POR EL SOLICITANTE

RECIBO N° 0548300

FECHA : 01/02/2017

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA  
LABORATORIO DE SUELOS

Ing. Leticia C. Mansilla Minaya  
JEFE



Figura 34. Análisis de suelos 1



# UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA

AV. UNIVERSITARIA S/N - TINGO MARIA - CELULAR 941531359

Facultad de Agronomía - Laboratorio de Análisis de Suelos

analisisdesuelosunas@hotmail.com



## ANÁLISIS DE SUELOS

SOLICITANTE		SELENI VISLAO BENAVIDES							PROCEDENCIA					MOYOBAMBA - SAN MARTIN										
N°	COD. LAB.	DATOS			ANÁLISIS MECÁNICO			pH	M.O.	N	P	K	CIC	CAMBIABLES Cmol(+)/kg										
		SECTOR	CULTIVO	CODIGO DE MUESTRA	Arena %	Arcilla %	Limo %							Textura	Ca	Mg	K	Na	Al	N	CiCe	% Res. Camb.	% Ac. Camb.	% Sat. Al
10	S2010	SAN MIGUEL	CAFE CATURRA 3 AÑOS	CA3-R1	29.2	36.4	34.4	Franco Arcilloso	4.82	4.03	0.18	1.67	160.18	---	3.61	0.81	---	---	4.00	0.20	8.62	51.25	48.75	46.43
11	S2011	SAN MIGUEL	CAFE CATURRA 3 AÑOS	CA3-R2	37.2	34.4	28.4	Franco Arcilloso	4.90	3.96	0.18	2.44	163.43	---	3.28	0.75	---	---	3.10	0.50	7.63	52.82	47.18	40.63
12	S2012	SAN MIGUEL	CAFE CATURRA 3 AÑOS	CA3-R3	35.2	36.4	28.4	Franco Arcilloso	4.71	3.68	0.17	1.43	182.42	---	4.21	0.88	---	---	5.30	0.20	10.59	48.04	51.96	50.07
13	S2013	SAN MIGUEL	CAFE CATURRA 4 AÑOS	CA4-R1	19.2	68.4	32.4	Arcilloso	6.02	1.98	0.09	4.90	113.45	13.75	8.98	1.64	0.44	2.69	---	---	---	100.00	0.00	0.00
14	S2014	SAN MIGUEL	CAFE CATURRA 4 AÑOS	CA4-R2	7.2	68.4	24.4	Arcilloso	5.88	1.91	0.09	2.98	103.20	13.62	9.47	1.13	0.85	2.18	---	---	---	100.00	0.00	0.00
15	S2015	SAN MIGUEL	CAFE CATURRA 4 AÑOS	CA4-R3	37.2	48.4	14.4	Arcilloso	6.41	1.34	0.06	1.74	136.69	25.40	9.09	1.04	0.71	5.18	---	---	---	100.00	0.00	0.00
16	S2016	SAN MIGUEL	CAFE CATURRA 8 AÑOS	CA8-R1	35.2	32.4	32.4	Franco Arcilloso	4.51	3.99	0.18	5.60	66.97	---	3.12	0.79	---	---	5.80	0.80	10.51	37.17	62.83	55.21
17	S2017	SAN MIGUEL	CAFE CATURRA 8 AÑOS	CA8-R2	35.2	30.4	34.4	Franco Arcilloso	4.78	3.61	0.16	3.05	138.44	---	3.12	0.86	---	---	3.80	0.50	8.28	48.04	51.96	45.92
18	S2018	SAN MIGUEL	CAFE CATURRA 8 AÑOS	CA8-R3	35.2	34.4	30.4	Franco Arcilloso	4.88	3.32	0.15	1.36	34.98	---	3.17	0.98	---	---	4.80	0.80	9.75	42.56	57.44	49.23

MUESTREADO POR EL SOLICITANTE  
RECIBO N° 0548300  
FECHA : 01/02/2017

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA  
LAB. ANALISIS DE SUELOS  
*[Firma]*  
Ing. Leticia Michoilla Minaya  
JEFE



Figura 35. Análisis de suelos 2



# UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA

Tingo Maria

Facultad de Agronomía - Laboratorio de Análisis de Suelos

Av. Universitaria s/n Telef. (062) 562342 - Celular 941531359 Aptdo. 158

analisisdesuelosunsa@hotmail.com



## ANALISIS ESPECIAL

SOLICITANTE:			SELENI VISLAO BENAVIDES					PROCEDENCIA:					MOYOBAMBA - SAN MARTIN			
Datos de la muestra			PH	Porcentaje				Porcentaje					Cu ppm	Fe ppm	Zn ppm	Mn ppm
Código	Tipo	Ref.		Humedad (%)	Materia Seca	N (base seca) (%)	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (%)	Ca (%)	Mg (%)	K (%)	Na (%)					
S2001	Hoja de café	CA3-R1	---	0.14	99.86	3.76	0.48	0.103	0.043	1.08	0.21	1.45	12.46	1.67	44.74	
S2002	Hoja de café	CA3-R2	---	0.15	99.85	2.39	0.45	0.105	0.048	0.90	0.15	1.89	13.86	1.44	39.53	
S2003	Hoja de café	CA3-R3	---	0.15	99.85	2.30	0.36	0.113	0.043	0.62	0.17	1.43	16.45	1.54	25.88	
S2004	Hoja de café	CA4-R1	---	0.18	99.82	2.27	0.40	0.100	0.036	0.88	0.10	0.78	20.04	0.89	56.77	
S2005	Hoja de café	CA4-R2	---	0.18	99.82	1.88	0.34	0.221	0.044	0.74	0.13	0.67	16.64	1.33	24.40	
S2006	Hoja de café	CA4-R3	---	0.17	99.83	2.24	0.47	0.114	0.059	1.04	0.26	1.22	18.86	1.77	35.49	
S2007	Hoja de café	CA5-R1	---	0.16	99.84	2.48	0.57	0.110	0.048	0.49	0.14	1.31	20.81	1.42	41.61	
S2008	Hoja de café	CA5-R2	---	0.15	99.85	2.24	0.49	0.113	0.064	0.76	0.31	1.33	36.67	1.56	33.44	
S2009	Hoja de café	CA5-R3	---	0.17	99.83	2.49	0.38	0.082	0.038	0.17	0.10	4.60	15.33	4.60	69.52	

Tingo Maria, 06 de febrero del 2017

MUESTREADO POR EL SOLICITANTE

Recibo N° 0548300

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA  
LABORATORIO DE ANÁLISIS DE SUELOS  
  
Ing. Leticia C. Mancilla Mimbaya  
JEFE



Figura 36. Análisis especial del tejido foliar de café 1



# UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA

Tingo Maria

Facultad de Agronomía - Laboratorio de Análisis de Suelos

Av. Universitaria s/n Telef. (082) 562342 - Celular 941531359 Aptdo. 156

analisis@suelosunsa@hotmail.com



## ANALISIS ESPECIAL

SOLICITANTE:			SELENI VISLAO BENAVIDES					PROCEDENCIA:					MOYOBAMBA - SAN MARTIN			
Datos de la muestra			PH	Porcentaje				Porcentaje								
Código	Tipo	Ref.		Humedad (%)	Materia Seca	N (base seca) (%)	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (%)	Ca (%)	Mg (%)	K (%)	Na (%)	Cu ppm	Fe ppm	Zn ppm	Mn ppm	
S2010	Hoja de café	CR3-R1	---	0.17	99.83	3.15	0.48	0.132	0.031	0.22	0.17	3.76	74.18	3.54	74.84	
S2011	Hoja de café	CR3-R2	---	0.15	99.85	2.43	0.44	0.086	0.029	0.94	0.52	1.87	12.10	2.09	23.10	
S2012	Hoja de café	CR3-R3	---	0.15	99.85	1.26	0.36	0.080	0.032	0.28	0.39	1.99	57.57	2.66	38.20	
S2013	Hoja de café	CR4-R1	---	0.16	76.45	2.37	0.40	0.093	0.027	0.45	0.19	3.23	84.54	1.45	23.47	
S2014	Hoja de café	CR4-R2	---	0.13	99.87	1.28	0.50	0.126	0.034	0.84	0.50	1.10	16.47	1.10	51.60	
S2015	Hoja de café	CR4-R3	---	0.13	99.87	0.94	0.50	0.133	0.042	0.97	0.21	1.89	13.37	1.78	44.78	
S2016	Hoja de café	CR5-R1	---	0.16	99.84	1.81	0.43	0.078	0.030	0.86	0.20	2.99	21.06	1.88	18.51	
S2017	Hoja de café	CR5-R2	---	0.16	99.84	2.04	0.33	0.078	0.056	1.00	0.23	1.76	85.56	1.43	85.56	
S2018	Hoja de café	CR5-R3	---	0.15	99.85	1.82	0.37	0.092	0.038	0.92	0.22	1.23	61.61	9.90	25.96	

Tingo Maria, 06 de febrero del 2017

MUESTREADO POR EL SOLICITANTE

Recibo N° 0548300

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA  
LAB ANALISIS DE SUELOS

*[Firma]*

Ing. Luis G. Nuñez Minaya  
JEFE



Figura 37. Análisis especial del tejido foliar de café 2



# UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA

Tingo Maria

Facultad de Agronomía - Laboratorio de Análisis de Suelos

Av. Universitaria s/n Telef. (082) 562342 - Celular 941521359 Aprdo. 156

analisisdesuelosunas@hotmail.com



## ANALISIS ESPECIAL

SOLICITANTE:			SELENI VISLAO BENAVIDES					PROCEDENCIA:				MOYOBAMBA - SAN MARTIN			
Datos de la muestra			PH	Porcentaje				Porcentaje				Cu ppm	Fe ppm	Zn ppm	Mn ppm
Código	Tipo	Ref.		Humedad (%)	Materia Seca	N (base seca) (%)	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (%)	Ca (%)	Mg (%)	K (%)	Na (%)				
S2019	Raíz de café	CA3-R1	—	0.15	99.85	2.05	0.48	0.082	0.040	0.82	0.11	11.85	16.62	20.16	15.73
S2020	Raíz de café	CA3-R2	—	0.15	99.85	0.95	0.48	0.091	0.062	0.46	0.15	18.49	17.61	28.39	28.39
S2021	Raíz de café	CA3-R3	—	0.14	99.86	1.28	0.45	0.102	0.084	0.53	0.19	73.18	18.79	15.70	19.35
S2022	Raíz de café	CA4-R1	—	0.16	99.84	1.47	0.32	0.219	0.085	0.61	0.43	14.89	20.81	30.11	14.78
S2023	Raíz de café	CA4-R2	—	0.15	99.85	2.40	0.52	0.075	0.035	0.93	0.22	17.56	18.77	19.32	14.02
S2024	Raíz de café	CA4-R3	—	0.14	99.86	2.33	0.32	0.092	0.048	0.39	0.33	14.58	16.57	34.68	13.70
S2025	Raíz de café	CA5-R1	—	0.16	99.84	2.25	0.40	0.091	0.059	0.37	0.22	15.84	14.20	17.37	35.40
S2026	Raíz de café	CA5-R2	—	0.15	99.85	1.88	0.45	0.076	0.047	0.34	0.14	27.07	16.44	29.70	58.73
S2027	Raíz de café	CA5-R3	—	0.13	99.87	2.25	0.52	0.081	0.049	0.33	0.21	21.14	20.13	30.09	47.65

Tingo Maria, 06 de febrero del 2017

MUESTREADO POR EL SOLICITANTE

Recibo N° 0548300



Ing. Luis J. YB  
JEFE



Figura 38. Análisis especial del tejido radicular 1



# UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA

Tingo María  
 Facultad de Agronomía - Laboratorio de Análisis de Suelos  
 Av. Universitaria s/n Telef. (062) 562342 - Celular 941531359 Apto. 156  
 email: info@unasesva.edu.pe



## ANÁLISIS ESPECIAL

SOLICITANTE:			SELENI VISLAO BENAVIDES					PROCEDENCIA:					MOYOBAMBA - SAN MARTIN			
Datos de la muestra			PH	Porcentaje				Porcentaje					Cu ppm	Fe ppm	Zn ppm	Mn ppm
Código	Tipo	Ref.		Humedad (%)	Materia Seca	N (base seca) (%)	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (%)	Ca (%)	Mg (%)	K (%)	Na (%)					
S2028	Raíz de café	CR3-R1	—	0.16	99.84	2.47	0.55	0.065	0.025	0.07	0.05	12.58	60.22	18.39	18.92	
S2029	Raíz de café	CR3-R2	—	0.15	99.85	2.24	0.48	0.082	0.039	0.69	0.19	13.08	30.78	30.01	48.25	
S2030	Raíz de café	CR3-R3	—	0.15	99.85	2.50	0.45	0.119	0.034	0.93	0.11	47.01	54.46	34.67	49.68	
S2031	Raíz de café	CR4-R1	—	0.15	99.85	2.43	0.35	0.125	0.050	0.22	0.21	30.41	65.79	25.56	70.00	
S2032	Raíz de café	CR4-R2	—	0.16	99.84	2.43	0.43	0.103	0.046	0.50	0.16	24.41	42.36	22.63	52.06	
S2033	Raíz de café	CR4-R3	—	0.13	99.87	1.26	0.37	0.107	0.057	0.44	0.20	20.88	83.74	14.74	53.37	
S2034	Raíz de café	CR5-R1	—	0.17	99.83	2.37	0.49	0.080	0.039	0.30	0.08	18.38	52.82	24.98	28.06	
S2035	Raíz de café	CR5-R2	—	0.13	99.87	1.28	0.45	0.065	0.036	0.23	0.05	30.48	55.91	25.98	37.49	
S2036	Raíz de café	CR5-R3	—	0.15	99.85	0.95	0.51	0.070	0.040	0.19	0.03	25.95	69.57	16.01	27.16	

Tingo María, 06 de febrero del 2017  
 MUESTREADO POR EL SOLICITANTE  
 Recibo N° 0548388

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA  
 FACULTAD DE AGRONOMIA  
 LABORATORIO DE ANÁLISIS DE SUELOS  
  
 Ing. Luis G. Manuella Mchaya  
 JEFE



Figura 39. Análisis especial del tejido radicular 2.

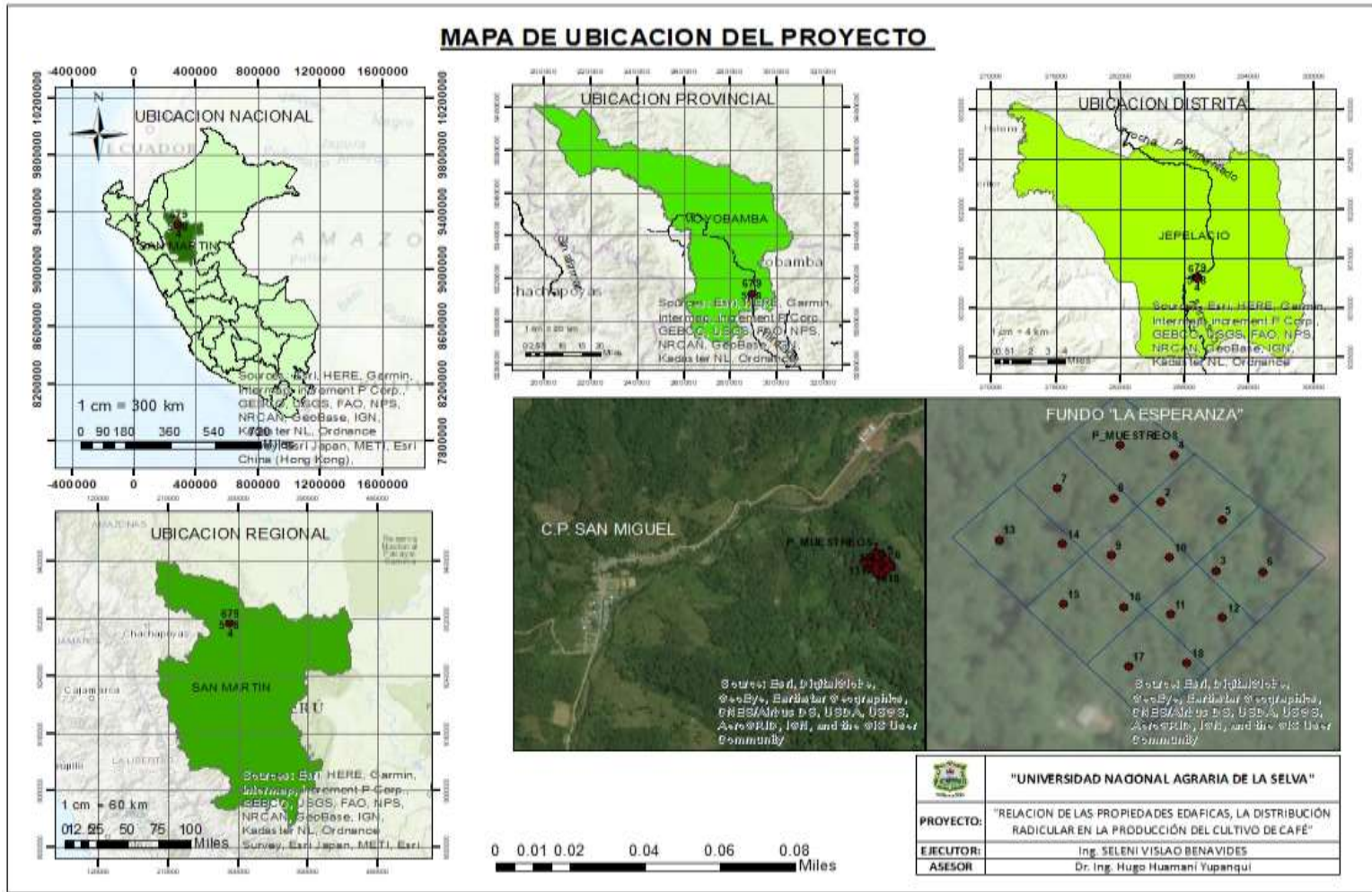


Figura 40. Mapa de ubicación del trabajo de investigación.

### DISEÑO EXPERIMENTAL DE LAS PARCELAS Y PUNTOS DE MUESTREOS

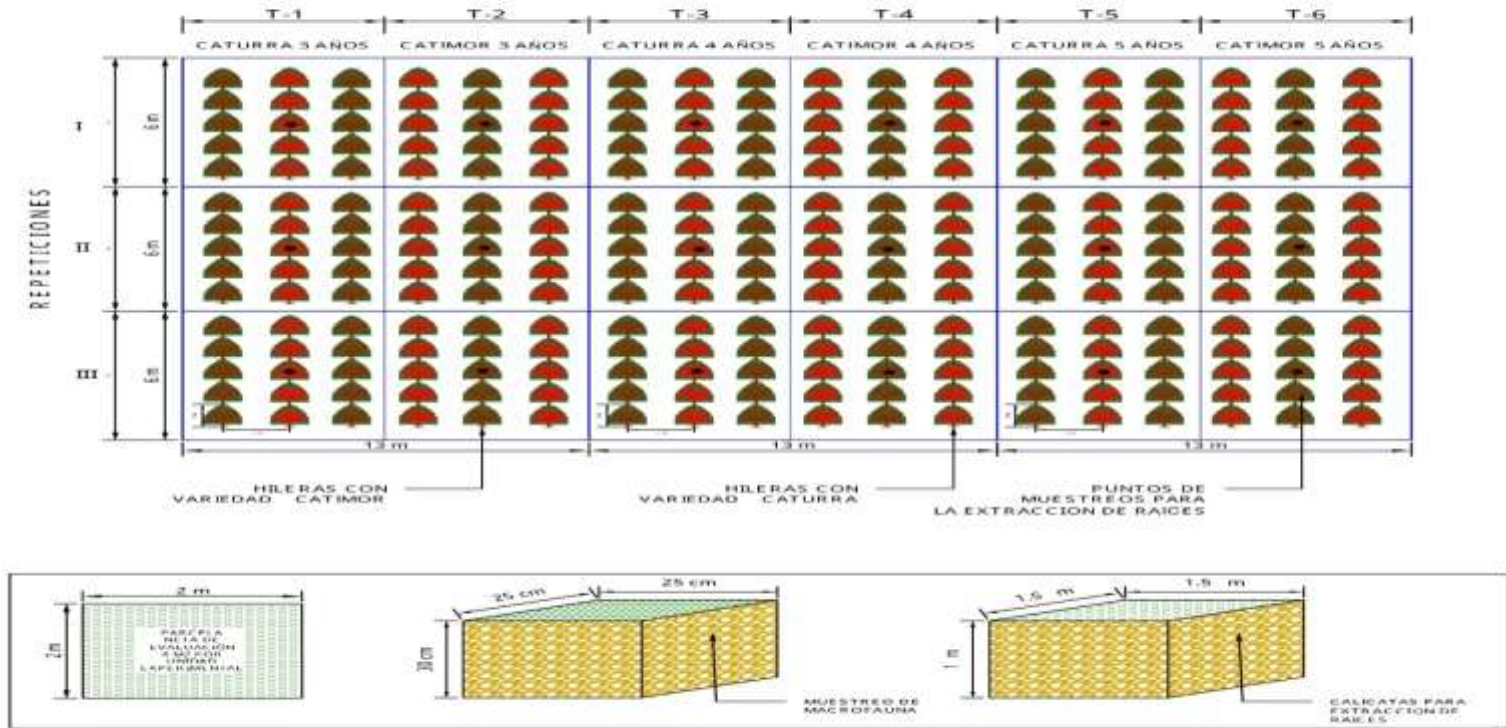


Figura 41. Croquis de la parcela experimental

**Cuadro 30.** Resumen del análisis de variancia de las propiedades físicas del suelo.

F.V.	G.L.	Textura						Densidad aparente		Porosidad total		Índice de penetrabilidad	
		Arena		Limo		Arcilla		CM	Sig.	CM	Sig.	CM	Sig.
		CM	Sig.	CM	Sig.	CM	Sig.						
Bloques	2	62.888889	NS	32.888889	NS	60.66667	NS	0.000918	NS	1.226066	NS	0.006	NS
Tratamientos	5	83.022222	NS	88.888889	S	212.26667	S	0.017818	AS	25.261337	AS	0.035	AS
Error experimental	10	79.155556		20.355556		52.13333		0.001754		2.505328		0.004	
Total	17												
C.V. %		30.89		14.34		18.18		3.21		3.12		11.16	

**Cuadro 31.** Resumen del análisis de variancia de las propiedades químicas del suelo.

F.V.	G.L.	pH		M.O.		Elementos primarios						CIC		Cationes Cambiables				Sat. Al	
		C.M.	Sig.	C.M.	Sig.	N		P		K		C.M.	Sig.	Ca		Mg		C.M.	Sig.
						C.M.	Sig.	C.M.	Sig.	C.M.	Sig.			C.M.	Sig.	C.M.	Sig.		
Bloques	2	0.07	NS	0.09	NS	0.000	NS	6.36	NS	2407.90	NS	3.13	NS	0.03	NS	0.06	NS	10.05	NS
Tratamientos	5	1.06	AS	3.09	AS	0.006	AS	5.82	NS	3547.90	S	34.42	NS	24.95	AS	0.25	AS	1952.22	AS
Error Exp.	10	0.07		0.04		0.000		3.02		726.36		10.88		0.36		0.04		46.28	
Total	17																		
C.V. (%)	=	5.24		6.59		6.59		66.83		21.73		27.81		10.91		21.14		20.90	

NS: No significativo ( $\alpha = 0.05$ ) S: Significativo ( $\alpha = 0.05$ ) AS: Altamente significativo ( $\alpha = 0.01$ )

**Cuadro 32.** Resumen del análisis de variancia de las propiedades biológicas del suelo.

F.V.	G.L.	SC	CM	F- calculado	F – Tabulado			
					0.05	Sig.	0.01	Sig.
Bloques	2	0.11887778	0.05943889	0.2213858	4.10282102	NS	7.55943216	NS
Tratamientos	5	0.83211111	0.16642222	0.6198554	3.32583453	NS	5.63632619	NS
Error experimental	10	2.68485556	0.26848556					
<b>Total</b>	17	3.63584444						
C.V. (%)	=	45.67						

NS: No significativo ( $\alpha = 0.05$ )

**Cuadro 33.** Resumen del análisis de variancia de las características biométricas del cafeto

F.V.	G.L.	Diámetro de tallo		Altura de planta		Longitud de la rama más grande		N.º de ramas		Profundidad de raíces		Área radicular		Proyección de la copa	
		C.M.	Sig.	C.M.	Sig.	C.M.	Sig.	C.M.	Sig.	C.M.	Sig.	C.M.	Sig.	C.M.	Sig.
		Bloques	2	0.568	NS	0.137	NS	0.002	NS	6.056	NS	55.39	NS	0.001	NS
Tratamientos	5	0.673	NS	0.184	NS	0.033	NS	248.9	AS	731.4	AS	0.007	NS	0.090	AS
Error Experimental	10	0.561		0.113		0.014		23.66		84.256		0.009		0.014	
<b>Total</b>	17														
C.V. (%)	=	19.3		19.19		14.27		7.51		18.88		46.49		19.34	

NS: No significativo ( $\alpha = 0.05$ ) AS: Altamente significativo ( $\alpha = 0.01$ )

**Cuadro 34.** Resumen del análisis de variancia de los macro y microelementos de las hojas de café 1.

F.V.	G.L.	Humedad %		Materia seca		N %		P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> %		Ca %		Mg %		k %		Na %	
		C.M.	Sig.	C.M.	Sig.	C.M.	Sig.	C.M.	Sig.	C.M.	Sig.	C.M.	Sig.	C.M.	Sig.	C.M.	Sig.
Bloques	2	0.0001	NS	30.50	NS	1.03	S	0.61	NS	78.51	NS	156.89	NS	806.24	NS	28454.50	NS
Tratamientos	5	0.0003	NS	30.26	NS	0.58	NS	0.74	NS	2672.86	NS	167.90	NS	1267.04	NS	18961.35	NS
Error Exp.	10	0.0001		30.46		0.24		2.02		1572.49		80.83		642.38		10968.01	
<b>Total</b>	<b>17</b>																
C.V. (%)	=	6.24		5.60		22.38		31.09		37.97		21.78		34.64		44.70	

NS: No significativo ( $\alpha = 0.05$ ) S: Significativo ( $\alpha = 0.05$ )

**Cuadro 35.** Resumen del análisis de variancia de los macro y microelementos de las hojas de café 2.

F.V.	G.L.	Cu ppm		Fe ppm		Zn ppm		Mn ppm	
		C.M.	Sig.	C.M.	Sig.	C.M.	Sig.	C.M.	Sig.
Bloques	2	1099118.48	NS	1032982.74	NS	8625326.68	NS	132192.55	NS
Tratamientos	5	1102135.74	NS	10410720.84	NS	4153372.51	NS	725986.50	NS
Error Exp.	10	1145176.94		8905343.47		3635650.34		6422423.01	
<b>Total</b>	<b>17</b>								
C.V. (%)	=	55.84		92.87		81.63		61.13	

NS: No significativo ( $\alpha = 0.05$ )

**Cuadro 36.** Resumen del análisis de variancia de los macro y microelementos de las raíces de café 1.

F.V.	G.L.	Humedad %		Materia seca		N %		P205		Ca %		Mg %		K %	
		CM	Sig.	CM	Sig.	CM	Sig.	CM	Sig.	CM	Sig.	CM	Sig.	CM	Sig.
Bloques	2	0.000	NS	0.000	NS	0.273	NS	0.002	NS	0.001	NS	0.000	NS	0.025	NS
Tratamientos	5	0.000	NS	0.000	NS	0.423	NS	0.007	NS	0.001	NS	0.000	NS	0.078	NS
Error experimental	10	0.000		0.000		0.278		0.004		0.001		0.000		0.061	
<b>Total</b>	<b>17</b>														
C.V. (%)	=	6.28		0.01		27.29		14.18		36.41		31.68		53.23	

NS: No significativo ( $\alpha = 0.05$ )

**Cuadro 37.** Resumen del análisis de variancia de los macro y microelementos de las raíces de café 2.

F.V.	G.L.	Na %		Cu ppm		Fe ppm		Zn ppm		Mn ppm	
		CM	Sig.	CM	Sig.	CM	Sig.	CM	Sig.	CM	Sig.
Bloques	2	0.002	NS	434.158	NS	279.526	NS	15.780	NS	130.927	NS
Tratamientos	5	0.025	AS	113.124	NS	1482.959	AS	30.393	NS	815.650	AS
Error experimental	10	0.004		236.597		97.724		54.357		96.417	
<b>Total</b>	<b>17</b>										
C.V. (%)	=	35.35		63.24		24.36		30.26		27.93	

NS: No significativo ( $\alpha = 0.05$ ) AS: Altamente significativo ( $\alpha = 0.01$ )

**Cuadro 38.** Resumen del análisis de variancia del rendimiento del café en kg/planta y qq/ha<sup>-1</sup>.

F. V	GL	Rendimiento			
		kg/planta		qq/ha <sup>-1</sup>	
		C.M.	Sig.	C.M.	Sig.
Bloques	2	0.00057	NS	7.05556	NS
Tratamientos	5	0.03099	AS	382.58889	AS
Error Exp.	10	0.00109		13.45556	
Total	17				
C.V. (%)		9.58		9.58	

NS: No significativo ( $\alpha = 0.05$ ) AS: Altamente significativo ( $\alpha = 0.01$ )

**Cuadro 39.** ANVA de correlación de rendimiento y diámetro de tallo.

Análisis de varianza	Rendimiento				Diámetro de tallo		
	GL	SC	CM	Sig.	SC	CM	Sig.
Regresión	3	1882.77	627.59	S	7.30	2.43	S
Residuo	14	178.84	12.77		2.81	0.20	
Total	17	2061.61			10.11		
$r = 0.96$	$r^2 = 0.91$				$r = 0.85$	$r^2 = 0.72$	

S: Significativo ( $\alpha = 0.05$ )

**Cuadro 40.** ANVA de correlación de altura de planta.

Análisis de varianza	Altura de planta			
	GL	SC	CM	Sig.
Regresión	5	2.15	0.43	S
Residuo	12	0.17	0.01	
Total	17	2.32		

$$r = 0.96$$

$$r^2 = 0.93$$

S: Significativo ( $\alpha = 0.05$ )

**Cuadro 41.** ANVA de correlación de longitud de la rama más grande y área radicular.

Análisis de varianza	Longitud de rama más grande				Área de radicular		
	GL	SC	CM	Sig.	SC	CM	Sig.
Regresión	2	0.28	0.14	S	0.06	0.03	S
Residuo	15	0.02	0.00		0.07	0.01	
Total	17	0.30			0.13		

$$r = 0.97$$

$$r^2 = 0.94$$

$$r = 0.67$$

$$r^2 = 0.45$$

S: Significativo ( $\alpha = 0.05$ )

**Cuadro 42.** ANVA de correlación del número de ramas y profundidad radicular.

Análisis de varianza	Nº de ramas				Profundidad radicular		
	GL	SC	CM	Sig.	SC	CM	Sig.
Regresión	4	1280.94	320.23	*	4325.07	1081.27	*
Residuo	13	212.17	16.32		285.20	21.94	
Total	17	1493,11			4610.28		
$r = 0.93$	$r^2 = 0.86$				$r = 0.97$	$r^2 = 0.94$	

S: Significativo ( $\alpha = 0.05$ )

**Cuadro 43.** Grupos taxonómicos de la macrofauna del suelo.

Grupos taxonómicos	T <sub>3</sub>			T <sub>4</sub>			T <sub>5</sub>			T <sub>4</sub>			T <sub>5</sub>			T <sub>6</sub>			Total
	(Catimor - 3 años)			(Catimor - 4 años)			(Catimor - 5 años)			(Caturra - 3 años)			(Caturra - 4 años)			(Caturra - 5 años)			
	R1	R2	R3	R1	R2	R3	R1	R2	R3	R1	R2	R3	R1	R2	R3	R1	R2	R3	
Haplotaxida (lombriz de tierra)	11	5	13	0	12	1	16	17	9	5	5	8	11	4	4	2	4	5	132
Isópoda (termitas, cochinilla)	0	5	4	1	0	1	4	0	2	0	0	66	4	0	0	0	5	0	92
Hymenóptera (hormigas)	0	5	0	3	0	7	5	1	2	4	0	2	8	9	2	13	3	1	65
Araneae (arañas)	0	2	1	1	0	2	9	2	2	0	0	1	0	0	2	1	0	0	23
Coleoptera (escarabajos)	1	1	1	1	2	0	2	0	2	1	1	1	4	2	0	2	0	0	21
Quilopodos (ciempies)	0	2	0	0	0	0	5	1	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	10
Dictioptera (cucarachas)	0	0	2	0	0	0	3	0	0	0	0	0	1	0	0	3	0	0	9
Dermaptera (tijereta)	0	1	1	0	0	0	0	1	1	0	1	0	0	1	0	0	1	1	8
Diptera (mosco)	0	0	0	0	0	3	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	5
Orthoptera (grillos)	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	2
Stylommatophora (caracol)	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
Diplopoda (milpies)	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
Lepidoptera (oruga)	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
<b>Total</b>	<b>12</b>	<b>21</b>	<b>22</b>	<b>8</b>	<b>15</b>	<b>14</b>	<b>46</b>	<b>22</b>	<b>18</b>	<b>10</b>	<b>7</b>	<b>78</b>	<b>29</b>	<b>16</b>	<b>8</b>	<b>23</b>	<b>14</b>	<b>7</b>	<b>370</b>