

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA
LA MOLINA**

FACULTAD DE AGRONOMIA



**“FORMA DE FÓSFORO INORGÁNICO PREDOMINANTE EN UN
SISTEMA AGROFORESTAL DE CACAO (*Theobroma cacao* L.), CON
COBERTURAS VEGETALES EN TARAPOTO”**

Presentado por:

MARÍA EUGENIA CUENCA MENDOZA

**PARA OPTAR POR EL TÍTULO DE
INGENIERO AGRÓNOMO**

Lima - Perú

2019

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA
LA MOLINA**

FACULTAD DE AGRONOMIA

**“FORMA DE FÓSFORO INORGÁNICO PREDOMINANTE EN
UN SISTEMA AGROFORESTAL DE CACAO (*Theobroma cacao* L.),
CON COBERTURAS VEGETALES EN TARAPOTO”**

Presentado por:

MARÍA EUGENIA CUENCA MENDOZA

**PARA OPTAR POR EL TÍTULO DE
INGENIERO AGRÓNOMO**

Sustentada y aprobada ante el siguiente jurado:

Dr. Alberto Julca Otiniano

PRESIDENTE

Dr. Oscar Loli Figueroa

ASESOR

Ing. Mg. Sc. Luis Tomassini Vidal

MIEMBRO

Ing. Mg. Sc. Braulio La Torre Martínez

MIEMBRO

DEDICATORIA

*A mis amados abuelos, Ana María y Alberto,
por inspirarme a ser mejor cada día.*

AGRADECIMIENTOS

Al Dr. Enrique Arévalo Gardini y el Mg. Sc. César Arévalo del Instituto de Cultivos Tropicales (ICT), por el apoyo, las facilidades y la confianza para la ejecución del presente estudio en sus instalaciones.

A mi asesor de tesis, el Dr. Oscar Loli, por sus consejos profesionales y por el apoyo constante en el desarrollo del presente trabajo.

ÍNDICE GENERAL

| | | |
|--------|---|----|
| I. | INTRODUCCIÓN | 1 |
| II. | REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA..... | 3 |
| 2.1. | CULTIVO DE CACAO | 3 |
| 2.1.1. | Origen e importancia del cultivo de cacao | 3 |
| 2.1.2. | Requerimientos agroecológicos del cultivo de cacao..... | 5 |
| 2.1.3. | Nutrición del cacao..... | 5 |
| 2.2. | SISTEMA AGROFORESTAL DE CACAO | 7 |
| 2.3. | CULTIVOS DE COBERTURA | 9 |
| 2.4. | FÓSFORO | 10 |
| 2.4.1. | Fósforo en el suelo | 10 |
| 2.4.2. | Formas de fósforo | 12 |
| 2.4.3. | Dinámica del fósforo | 12 |
| 2.4.4. | Extracción secuencial de fósforo..... | 14 |
| III. | MATERIALES Y MÉTODOS | 17 |
| 3.1. | LUGAR DE ESTUDIO..... | 17 |
| 3.2. | HIPÓTESIS | 17 |
| 3.3. | IDENTIFICACIÓN DE COBERTURAS..... | 17 |
| 3.4. | DISEÑO EXPERIMENTAL | 18 |
| 3.5. | ANÁLISIS ESTADÍSTICO | 20 |
| 3.6. | MUESTREO DE SUELOS | 20 |
| 3.7. | FASE DE LABORATORIO..... | 21 |
| 3.7.1. | Fraccionamiento secuencial de fósforo..... | 21 |
| 3.7.2. | Determinación de pH y C.E. | 23 |
| 3.7.3. | Determinación de Ca^{+2} - Mg^{+2} - K^{+1} | 23 |

| | | |
|--------|---|----|
| 3.7.4. | Determinación de fósforo inorgánico | 23 |
| 3.7.5. | Determinación de materia orgánica | 23 |
| IV. | RESULTADOS Y DISCUSIONES | 24 |
| 4.1. | IDENTIFICACIÓN DE COBERTURAS | 24 |
| 4.2. | EFFECTO DE LAS COBERTURAS SOBRE LOS PARÁMETROS DE FERTILIDAD EVALUADOS | 26 |
| 4.3. | EFFECTO DE LAS COBERTURAS SOBRE LAS FORMAS DE FÓSFORO INORGÁNICO. | 27 |
| 4.3.1. | Efecto sobre el fósforo soluble en agua | 27 |
| 4.3.2. | Efecto sobre fosfatos de hierro y aluminio de alta solubilidad | 28 |
| 4.3.3. | Efecto sobre fosfatos de hierro y aluminio de baja solubilidad | 29 |
| 4.3.4. | Efecto sobre los fosfatos cálcicos | 30 |
| 4.3.5. | Efecto sobre fósforo ocluido | 31 |
| 4.4. | EVALUACIÓN DE PARÁMETROS EVALUADOS ENTRE PROFUNDIDADES 32 | |
| 4.5. | EVALUACIÓN DE FORMAS DE FÓSFORO INORGÁNICO ENTRE PROFUNDIDADES | 33 |
| V. | CONCLUSIONES | 35 |
| VI. | RECOMENDACIONES | 36 |
| VII. | BIBLIOGRAFÍA..... | 37 |
| VIII. | ANEXOS | 42 |

ÍNDICE DE CUADROS

| | |
|---|----|
| Cuadro 1: Absorción aproximada de nutrientes del cultivo de cacao, para la producción de 1000 kg de grano seco..... | 6 |
| Cuadro 2: Cantidad estimada de nutrientes absorbidos por planta de cacao en diferentes estados de desarrollo. | 7 |
| Cuadro 3: Coberturas identificadas en el área de estudio..... | 19 |
| Cuadro 4: Profundidades de determinación..... | 19 |
| Cuadro 5: Parámetros evaluados..... | 19 |
| Cuadro 6: Determinación del porcentaje de cobertura por medio del método de cuadrantes. por ciento Cobertura, siendo 100 por ciento espesor máximo. | 24 |
| Cuadro 7: Taxonomía de especies indentificadas (EPPO 2018)..... | 25 |
| Cuadro 8: Efecto de las coberturas sobre los parámetros de fertilidad evaluados. | 26 |
| Cuadro 9: Efecto de las coberturas sobre el fósforo soluble en agua..... | 28 |
| Cuadro 10: Efecto de las coberturas sobre los fosfatos de hierro y aluminio de alta solubilidad. | 28 |
| Cuadro 11: Efecto de las coberturas sobre los fosfatos de hierro y aluminio de baja solubilidad. | 29 |
| Cuadro 12: Efecto de las coberturas sobre los fosfatos cálcicos..... | 30 |
| Cuadro 13: Efecto de las coberturas sobre el fosfato ocluido..... | 31 |
| Cuadro 14: Efecto de las profundidades sobre los parámetros de fertilidad evaluados. | 32 |
| Cuadro 15: Efecto de las profundidades sobre las formas de fósforo inorgánico..... | 34 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1: Producción por departamento del cultivo de cacao (<i>Theobroma cacao</i> L.). | 4 |
| Figura 2: Modelo conceptual de las transformaciones del P en el suelo con los componentes para su determinación siguiendo el procedimiento secuencial de Tiessen y Moir (1993) citado por Fernández y Turrión (2011). | 13 |
| Figura 3: Determinación de porcentaje de cobertura en un cuadrante. | 18 |
| Figura 4: Ilustración de profundidades de muestreo..... | 20 |
| Figura 5: Croquis Experimental del sistema agroforestal de cacao (<i>Theobroma cacao</i> L.) en la Estación Experimental “El Choclino”, San Martín. Compuesto por: T1= Parcela con cobertura de commelina; T2= Parcelas con cubierta de hojarasca; T3= Parcelas en descanso. | 21 |
| Figura 6: Flujograma de extracción secuencial de fósforo, secuencia de extractantes utilizados. El primer nivel corresponde a los extractantes y el último nivel a las formas de fósforo extraídas. | 22 |

ÍNDICE DE ANEXOS

| | |
|--|----|
| ANEXO 1: Áreas de producción nacional de cacao (<i>Theobroma cacao</i> L.) | 42 |
| ANEXO 2: Análisis de varianza de la variable pH vs. tratamiento y profundidad (cm). 43 | |
| ANEXO 3: Análisis de varianza de la variable conductividad eléctrica (dS.m ⁻¹) vs. tratamiento y profundidad (cm.) | 43 |
| ANEXO 4: Análisis de varianza de la variable magnesio (meq.100 g ⁻¹) vs. tratamiento y profundidad (cm). | 44 |
| ANEXO 5: Análisis de varianza de la variable potasio (meq.100 g ⁻¹) vs. tratamiento y profundidad (cm.) | 44 |
| ANEXO 6: Análisis de varianza de la variable fósforo disponible (ppm) vs. tratamiento y profundidad (cm.) | 45 |
| ANEXO 7: Análisis de varianza de la variable materia orgánica (por ciento) vs. tratamiento y profundidad (cm.) | 45 |
| ANEXO 8: Análisis de varianza de la variable fósforo soluble al agua (mg.kg ⁻¹) vs. tratamiento; profundidad (cm.) | 46 |
| ANEXO 9: Análisis de varianza de la variable fosfato de hierro y aluminio de alta solubilidad (mg.kg ⁻¹) vs. tratamiento y profundidad (cm.) | 46 |
| ANEXO 10: Análisis de varianza de la variable fosfato de hierro y aluminio de baja solubilidad (mg.kg ⁻¹) vs. tratamiento y profundidad (cm.) | 47 |
| ANEXO 11: Análisis de varianza de la variable fosfatos cálcicos (mg.kg ⁻¹) vs. tratamiento y profundidad (cm). | 47 |
| ANEXO 12: Análisis de varianza de la variable fósforo ocluido (mg.kg ⁻¹) vs. tratamiento y profundidad (cm.) | 48 |
| ANEXO 13: Resultados de parámetros de fertilidad evaluados en la cobertura <i>Commelina diffusa</i> | 48 |

| | |
|---|----|
| ANEXO 14: Resultados de parámetros de fertilidad evaluados en la cobertura de hojarasca. | 51 |
| ANEXO 15: Resultados de parámetros de fertilidad evaluados en las parcelas en descanso. | 53 |
| ANEXO 16: Resultados de formas de fósforo inorgánico evaluados en la cobertura <i>Commelina diffusa</i> | 56 |
| ANEXO 17: Resultados de formas de fósforo inorgánico evaluados en la cobertura de hojarasca. | 58 |
| ANEXO 18: Resultados de formas de fósforo inorgánico evaluados en las parcelas de descanso. | 59 |

RESUMEN

Este estudio se realizó en la estación experimental “El Chocllino”, propiedad del Instituto de Cultivos Tropicales (ICT) en Tarapoto (San Martín, Perú), con el objetivo de evaluar la influencia de la cobertura de *Commelina diffusa*, hojarasca y parcelas en descanso, con predominio de la especie *Brachiaria brizantha*, en las formas de fósforo inorgánico en el suelo. Para ello se realizó un muestro de suelo en cada unidad experimental por cada profundidad: 0 – 5 cm, 5-15 cm y 15 – 30 cm. Y se determinó formas de fósforo inorgánico por medio del método de fraccionamiento secuencial propuesto por Szulczewski y Li (2007). La concentración media (mg.kg^{-1}) del fosfato soluble al agua (extraído con agua destilada) no presentó diferencias significativas entre la cobertura de hojarasca y commelina, pero ambas si mostraron significancia con las parcelas en descanso. No se encontraron diferencias significativas de fosfatos de hierro y aluminio de alta solubilidad (extraído con NH_4Cl 1 M) entre las tres coberturas. La concentración media (mg.kg^{-1}) de fosfatos de hierro y aluminio de baja solubilidad (extraído con NaOH 0.1 M) fueron mayores en la cobertura de hojarasca, seguido de las parcelas de descanso y la cobertura de commelina. Los fosfatos cálcicos (extraídos con HCl 0.5 M) presentaron mayor concentración media (mg.kg^{-1}) en las coberturas de hojarasca y commelina en comparación con las parcelas de descanso. La concentración media ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) del fósforo estructural (extraído con HCl 6M) fue mayor en las parcelas de descanso en comparación que la cobertura de hojarasca y commelina. Se puede concluir que la forma de fósforo inorgánico predominante en las tres coberturas evaluadas corresponde al fosfato ocluido, también que existe una relación entre los parámetros de fertilidad, de pH y calcio disponible con las concentraciones de fosfatos de hierro y aluminio y fosfatos cálcicos; y finalmente, las profundidades tienen un efecto sobre las formas más solubles de fósforo (fosforo soluble al agua, fosfatos de hierro y aluminio de alta solubilidad y fosfatos cálcicos).

Palabras claves: Fraccionamiento secuencial de fósforo, commelina, hojarasca, parcelas en descanso.

ABSTRACT

This study was done in the experimental station “El Choclino” that belongs to Tropicals Crops Institute (ICT) in Tarapoto (San Martín, Perú) which aim is to evaluate the influence of the cover for the *Commelina diffusa*, litter and resting plots, specially the *Brachiaria brizantha* species in inorganic phosphorus type in the ground. Therefore, a soil sampling was done in every experimental unit for each depth: 0 – 5 cm, 5 – 15 cm and 15-30 cm. Some kinds of inorganic phosphorus was determinate by the sequential fractionation method by Szulczewski and Li (2007). The mean concentration ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) of the phosphate soluble in water (extracted with distilled water) didn't show significant differences between the cover of the litter and the *Commelina diffusa* but both show significance with the resting plots. It wasn't found significant differences of phosphate of iron and aluminum of high solubility (extracted with NH_4Cl 1 M) were bigger in the cover of the litter, followed by the resting plots and the cover of commelina. Calcium phosphate (extracted with HCl 0.5 M) show a bigger mean concentration ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) in the cover of the litter and commelina in comparison with the resting plots. The mean concentration ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) of the structural phosphorus (extracted with HCl 6M) was bigger than the resting plots in comparison with the cover of the litter and commelina. It is possible to conclude that the kind of inorganic phosphorus predominating in the three covers evaluated belongs to the occluded phosphorus, it also exists a relationship between the parameters of fertility, pH and available calcium; finally, the deeps have an effect upon the more soluble forms of phosphorus (phosphorus soluble in water, phosphate of iron and aluminum of high solubility and calcium phosphates).

Key words: : phosphorus sequential fractionation method, commelina, litter, resting plots.

I. INTRODUCCIÓN

El fósforo es un macronutriente primario esencial para las plantas, actúa a nivel de la fotosíntesis, respiración, transferencia de energía (como parte del ATP), división y crecimiento celular, entre otros procesos (Yamada, 2004). Además, de favorecer el rápido crecimiento y desarrollo del sistema radicular, mejora la calidad del producto cosechado, siendo determinante en la formación de la semilla (Havlin *et al.* 1999, citado por Boschetti *et al.* 2003).

La presencia de fósforo en el suelo puede ser agrupado en formas lábiles, que son compuestos más solubles (orgánicos o inorgánicos) o que rápidamente pueden pasar a la solución suelo y no lábiles, que son formas que difícilmente pasan a la solución suelo. El fósforo puede encontrarse en diferentes formas en el suelo; sin embargo, las que predominan en formas solubles inorgánicas que pueden ser absorbidas por las plantas son H_2PO_4^- y HPO_4^{-2} (Boschetti *et al.* 2003). Además, se puede encontrar como fósforo orgánico asociado o no a los ácidos fúlvicos y húmicos, como inositol fosfato y fosfolípidos, así como también asociado a la flora microbial con diferentes grados de solubilidad (Picone y Zamuner 2002).

Desde este punto de vista las formas de fósforo en el suelo presentan diferentes grados de solubilidad, por lo que la determinación de estas formas y su grado de solubilidad es de marcada importancia en la fertilidad del suelo. El proceso de determinación de las formas de fósforo presentes en un suelo es conocido como fraccionamiento secuencial del fósforo y en general permite determinar las formas orgánicas e inorgánicas, así como los fosfatos de calcio, de aluminio y de hierro principalmente.

El fraccionamiento de fósforo es un método realizado para determinar la concentración de sus distintas formas en el suelo, las cuales van a ser determinadas por su origen (Urioste *et al.* 1996, Molina *et al.* 1999 citado por Boschetti *et al.* 2003) y las prácticas de manejo empleadas (Selles *et al.* 1995, Beck y Sanchez 1994, citado por Boschetti *et al.* 2003). La importancia de las metodologías de fraccionamiento, radica en la determinación potencial

de formas de distintas solubilidades de fósforo en el suelo (Rabuffetti *et al.* 2017), permite cuantificar las fracciones y con ello evaluar su evolución a través del tiempo.

El objetivo principal para el desarrollo del trabajo, es determinar la forma de fósforo inorgánico predominante en el sistema agroforestal con el cultivo de cacao (*Theobroma cacao* L.) según el efecto de las coberturas vegetales. Y como objetivos específicos, determinar la relación entre las formas de fósforo inorgánico extraídas y los parámetros de fertilidad evaluados; y comparar las concentraciones de las formas de fósforo inorgánico evaluadas en tres profundidades: 0 - 5, 5 - 15 y de 15 - 30 cm.

II. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

2.1. CULTIVO DE CACAO

2.1.1. Origen e importancia del cultivo de cacao

El cacao (*Theobroma cacao* L.) es una especie originaria del trópico húmedo de América del Sur cuyo centro de origen está localizado en la región comprendida entre las cuencas de los ríos Caquetá, Putumayo y Napo (MINAGRI 2016). Además, la existencia de poblaciones silvestres y nativas dispersas en la región centro y sur de la amazonía, indican que el centro de origen incluye las cuencas de los ríos Huallaga, Ucayali y Urubamba.

Geográficamente se extiende alrededor de los 10° de latitud norte y sur del Ecuador, distribuidos en el Oeste Africano (73.4 por ciento), América Latina (16.6 por ciento) y Sud Este (10.0 por ciento) (ICT 2004 e ICCO 2017). Sin embargo, se puede encontrar hasta las latitudes subtropicales entre 23°26' (límite del Trópico de Cáncer) al norte y 23°26' (límite del Trópico de Capricornio) al sur de la línea ecuatorial (MINAGRI 2016). Actualmente el cacao se cultiva en más de 60 países, entre los países de mayor producción se encuentra Costa de Marfil, Indonesia y Ghana, siendo también importante, la producción de Nigeria, Ecuador, Brasil y República Dominicana (ICCO 2017).

En el mercado mundial los granos de cacao generalmente se clasifican como cacao convencional y cacao fino de aroma, el primero presenta una producción de 90 por ciento a 92 por ciento, el cual pertenece al cacao de variedad “forastero” y proviene en su mayoría de África, Asia y dentro de América Latina, Brasil. El cacao fino de aroma tiene una producción que fluctúa entre 8 por ciento y el 10 por ciento, y es exportado total o parcialmente por algunos países de América Latina y el Caribe como: Ecuador, Perú, Colombia, Costa Rica, República Dominicana, Jamaica, Trinidad, etc., esta categoría pertenece al cacao de las variedades “criolla” y “trinitaria” y es característico por poseer aromas y sabores frutales, florales, de nueces y de malta (MINAGRI 2016).

El Perú tiene una participación del 2 por ciento en la producción mundial, ocupando el noveno lugar de importancia en el mundo y el segundo lugar entre los principales países productores y exportadores de cacao fino con una producción de 54.530 toneladas aproximadamente durante el año 2018; después de Ecuador.

El Sistema Integrado de Estadística Agraria (2016) y el Ministerio de Agricultura y Riego (2016) reporta que en el país existen 125,580 hectáreas de cacao en producción hasta el año 2016 con 107,922 toneladas totales y 0.8 toneladas por hectárea en promedio.

Además, dentro del área de producción nacional, la región San Martín ocupa el 40 por ciento, seguido por Junín con 14 por ciento, Cuzco con 14 por ciento y Ayacucho con 6 por ciento. En el rango del 2009 al 2015, la producción de cacao mostró un incremento anual de 15,5 por ciento, mostrando una tendencia ascendente tanto en producción como en área cosechada. El mapa de la producción de cacao en grano según las regiones se encuentra en el Anexo 1.

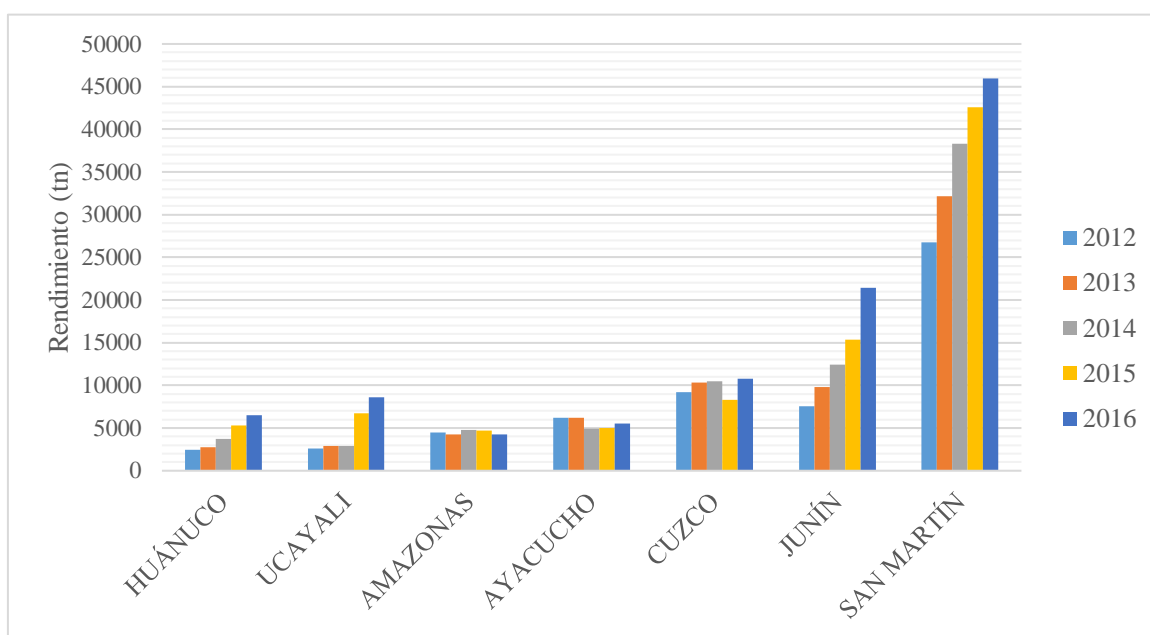


Figura 1: Producción por departamento del cultivo de cacao (*Theobroma cacao* L.).

FUENTE: MINAGRI (2016).

2.1.2. Requerimientos agroecológicos del cultivo de cacao

Según Leiva (2012), el cultivo de cacao presenta los siguientes requerimientos agroecológicos:

Altitud: 0 a 1200 msnm

Temperatura: 22°C a 30°C

Precipitación: 2500 mm, preferiblemente distribuidos durante el año.

HR: 80 por ciento

Sombra: En los primeros dos años de vida la planta necesita mayor cantidad de sombra (70 por ciento), después del tercer año en adelante los requerimientos de sombra disminuyen a 30 por ciento (Moreno y Sánchez 1990, citado por Leiva 2012).

Suelo: Suelos francos a franco-arcillosos, también suelos aluviales, sueltos y profundos, que le permitan a la raíz principal penetrar de 80 a 150 cm. El pH debe estar en el rango de 6.0 a 7.5 en la capa superficial, sin ser extremadamente ácido (pH menor a 4.0) o medianamente básico (pH mayor a 8.0).

2.1.3. Nutrición del cacao.

El cacao es un cultivo bastante demandante en lo que respecta a la fertilidad del suelo, esto depende de diferentes factores tales como el material genético, grado de sombreado, así como otros factores asociados a la edad de la planta, control de plagas y enfermedades (Leiva 2012), por lo cual es de suma importancia un manejo eficiente de los nutrientes para evitar y corregir posibles deficiencias nutricionales. Esto debe considerarse sobre todo cuando el cultivo está expuesto o sin sombra, donde la tasa fotosintética es mayor y aumenta la respuesta a la fertilización, debido a la correlación con la concentración de nitrógeno en las hojas (Costa *et al.* 2001, citado por Leiva 2012). En cambio, en un sistema agroforestal la demanda de aplicación de fertilizantes tiende a disminuir, debido principalmente al aporte de materia orgánica y a su lenta mineralización, lo cual favorece al reciclaje de nutrientes (Enríquez 1985). Además, cabe mencionar la postura de autores como Quiroz y Amores (citado por Sánchez *et al.* 2005), los cuales mencionan que no existe beneficio económico en la fertilización del cacao cuando es manejado en sistema agroforestal.

Los elementos que son más absorbidos son: el potasio, nitrógeno y calcio. De estos, el potasio siempre es requerido en mayores cantidades, salvo en los primeros meses de desarrollo, mientras que el fósforo y el magnesio son absorbidos en cantidades relativamente menores. En forma general, la extracción de nutrientes del cultivo de cacao es variable, por lo que se recomienda realizar un análisis de suelo a fin de establecer una fórmula de abonamiento con el equilibrio particular a cada condición, el cuadro 1 muestra diferentes extracciones de nutrientes para la producción de 1000 kg de grano seco por hectárea.

Cuadro 1: Absorción aproximada de nutrientes del cultivo de cacao, para la producción de 1000 kg de grano seco.

| Extracción total (kg.ha ⁻¹) | | | Fuentes consultadas: |
|---|-------------------------------|------------------|--|
| N | P ₂ O ₅ | K ₂ O | |
| 466.0 | 121.0 | 273.0 | Instituto de Cultivo Tropicales (2004) |
| 44.0 | 10.0 | 77.0 | Enríquez (1985) |

La extracción de nutrientes según el ICT (2004), considera la formación de chupones, brotes, ramas y frutos; siendo para la formación de frutos, una extracción total de 135,93 kg de nutrientes (N, P₂O₅, K₂O, Cal, MgO), que representa solamente el 13,07 por ciento del total de nutrientes extraídos. Asimismo, indica que la mayor extracción de nutrientes se da para la formación de chupones y brotes (561,72 kg de nutrientes), que representa más del 50 por ciento del total de nutrientes extraídos, constituyendo tejido vegetal sin importancia en el incremento de la productividad del cacao.

En base a estimaciones de los nutrientes requeridos en kg por hectárea, Enríquez (1985) recomienda un plan de fertilización para una plantación inicial de 10-30-10, y para una plantación establecida de 10-10-6-5 (5 por ciento de azufre (S) en forma de SO₄⁻²).

Cuadro 2: Cantidad estimada de nutrientes absorbidos por planta de cacao en diferentes estados de desarrollo.

| Estado del cultivo | Edad de la planta (meses) | Requerimiento nutricional promedio en kg.ha ⁻¹ | | | | | | |
|-------------------------|---------------------------|---|-----|-----|-----|-----|------|------|
| | | N | P | K | Ca | Mg | Mn | Zn |
| Vivero | 5-12 | 2,4 | 0,6 | 2,4 | 2,3 | 1,1 | 0,04 | 0,01 |
| Establecimiento | 28 | 136 | 14 | 156 | 113 | 47 | 3,9 | 0,5 |
| Inicio de la producción | 39 | 212 | 23 | 321 | 140 | 71 | 7,1 | 0,9 |
| Plena producción | 50 - 87 | 438 | 48 | 633 | 373 | 129 | 6,1 | 1,5 |

FUENTE: Mite y Motato (1998) citado por Leiva (2012).

2.2. SISTEMA AGROFORESTAL DE CACAO

El sistema agroforestal de cacao es un arreglo compuesto donde las especies leñosas tales como: árboles, arbustos y palmeras, son utilizadas en asociación con especies agrícolas (Vasconcellos *et al.* 2014). Posee los mismos atributos que cualquier sistema: límites, componentes, interacciones, entradas y salidas y una dinámica propia (Vera 1999). Dicho sistema se presenta como una alternativa económica y ecológicamente viable de producción agrícola y conservación de la biodiversidad (Da Silva *et al.* 2010); la cual cuenta con la capacidad para hacer compatibles la producción de alimentos, los servicios ambientales y el desarrollo rural, en comparación con el segmento agrícola actual que presenta un alto requerimiento energético y tiene un papel importante en la emisión de gases de efecto invernadero (Gonçalves 2017, Da Silva *et al.* 2010).

La principal ventaja de los sistemas agroforestales en comparación con los sistemas convencionales es el uso del suelo y el aprovechamiento más eficiente de los recursos naturales por la optimización de la energía solar y el reciclaje de nutrientes siendo el resultado final, un sistema potencialmente más productivo y sustentable (Madeiros 2009). Estos sistemas promueven la biodiversidad y productos diversificados lo cual resulta

fundamental para la estabilidad biológica y económica, pues incluye plantas de ciclo corto, largo y animales (Madeiros 2009, Vera 1999).

La presencia de árboles trae beneficios directos e indirectos que influyen en las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo; ya sean como florestas naturales o leguminosas, la presencia de especies arbóreas contribuye con el aporte de materia orgánica y el control de la erosión hídrica, de manera que reduce la severidad del impacto de las gotas de lluvia (Da Silva 2010, Pérez *et al.* 2012). Mejora la estructura del suelo y el ciclaje de nutrientes, promovida por las raíces y la acumulación de hojarasca (Madeiros 2009). Además, al mejorar la actividad de la biota del suelo y mejorar la disponibilidad de nutrientes se alcanza un equilibrio biológico que promueve el control de plagas y enfermedades (EMBRAPA, 2011).

En un sistema agroforestal de cacao, los árboles de sombra y los cacaotales compiten por nutrientes y agua, sobre todo por el gran desarrollo radicular de los primeros. Sin embargo, la acumulación de hojarasca y su posterior descomposición beneficia al ciclaje de nutrientes en el suelo. Durante su ciclo productivo, un cacaotal deposita cantidades considerables de hojarasca, entre 145 kg.ha⁻¹ a los 4 años de plantado hasta 500 y 1500 kg.ha⁻¹, a los 10 y 15 años respectivamente (Leiva 2012).

La hojarasca comprende la cama más superficial en ambientes forestales y está formada por hojas, ramas y órganos reproductivos, que ejercen muchas funciones para el equilibrio y dinámica de ese ecosistema, protege el suelo contra las elevadas temperaturas, almacena una gran cantidad de semillas prontas para germinar o en estado de dormancia, sirve de habitat para una abundante fauna compuesta por micro y macro invertebrados que actúan directamente en los procesos de descomposición, fertilizando naturalmente los suelos. Su descomposición es el principal medio de transferencia de los nutrientes para el suelo, por medio del ciclaje de nutrientes, responsables de los intercambios de elementos minerales entre los seres vivos y el ambiente que circunda (Da Silva *et al.* 2002).

2.3. CULTIVOS DE COBERTURA

Se denomina de esta manera a las coberturas vegetales que se siembran en asociación con un cultivo principal (intercalado, en relevo o rotación), a fin de proteger al suelo de los efectos erosivos del viento, la lluvia y las altas temperaturas (CIDICCO 2003). Los cultivos de cobertura representan una alternativa viable para la producción orgánica, puesto que favorecen la densidad y diversidad de microorganismos edáficos, mejorando las condiciones para el desarrollo de lombrices de tierra (López y Vega 2004), reducen la infestación de plantas espontáneas y en caso de especies leguminosas realizan la fijación simbiótica de nitrógeno atmosférico, en tal sentido, estudios realizados por Puertas *et al.* (2008) demostraron una mayor eficacia de fijación por parte de la especie *Centrosema macrocarpum*.

Los beneficios derivados de cultivos de cobertura abarcan desde la protección física del suelo contra la erosión y las fluctuaciones de temperatura, disminuir la percolación del suelo en caso sean coberturas superficiales, evitar la evaporación del agua del suelo, incrementa el contenido de materia orgánica en el perfil del suelo, las raíces de las plantas y los residuos vegetales contribuyen a mejorar la infiltración en el suelo y los agregados superficiales del suelo (Pound 1999, MINAGRI 2014). Además, la siembra de coberturas vegetales como algunas leguminosas o commelinas sirven como control de plantas espontáneas, ayudando a mantener la plantación libre de malezas (ICT 2004).

Los cultivos de cobertura aumentan el volumen total de raíces en el sistema agrícola, aumentando así la cantidad total de exudados potencialmente liberados por las raíces de las plantas lo cual facilita la absorción de nutrientes. Para poder mantener una acidez intercelular adecuada y poder absorber los nutrientes, constantemente están tomando y liberando aniones y cationes desde la rizósfera. Dependiendo de la forma de los nutrientes disponibles, el pH de la rizósfera puede disminuir o aumentar como resultado de la exudación de aniones orgánicos, adiciones de materia orgánica o liberación de H^+ u OH^- / HCO_3^- . El tener coberturas con mayor biomasa radicular, son características deseables para incrementar la materia orgánica del suelo, mejorar la infiltración y capacidad retentiva de humedad del suelo (Pound 1999). Un estudio de Puertas *et al.* (2008) realizado en el departamento de San Martín muestran que en promedio las raíces de *Arachis pintoi* y *Centrosema macrocarpum*

miden entre 25 y 40 cm., de la *Canavalia ensiformis* y *Calopogonium mucunoides* entre 13 y 15 cm. y *Callisia sp.* 5 cm. aproximadamente.

Según Pound (1999), los cultivos de cobertura ofrecen dentro de sus principales ventajas la simplicidad de manejo agronómico, el bajo riesgo de establecimiento del cultivo debido al tamaño de sus semillas (por ejemplo, *Canavalia ensiformis*, *Mucuna pruriens*, *Vicia faba*), presentar un rango ecológico alto, un buen ejemplo es la *Canavalia ensiformis* que puede desarrollarse en condiciones húmeda o semiáridas, a pleno sol o sombra parcial.

Dentro de las coberturas vegetales adaptadas a plantaciones tropicales y subtropicales se encuentran *Arachis pintoi*, *Calopogonium mucunoides*, *Callisia sp.*, *Canavalia ensiformis*, *Centrosema macrocarpum*, *Mucuna pruriens*, *Pueraria phaseoloides*, *Desmodium ovalifolium* y *Commelina diffusa* (Puertas et al. 2008).

2.4. FÓSFORO

2.4.1. Fósforo en el suelo

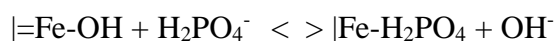
Del total del P que se encuentra en los suelos, entre 200 y 3000 mg kg⁻¹ de P, más del 90 por ciento del P total está presente en compuestos de baja solubilidad y menos de 0,1 por ciento de ese total se encuentra en la solución del suelo, el cual puede reaccionar con los distintos cationes e influir en su solubilidad (Mengel y Kirkby 2001, Thomas y Sharpley 2005). Típicamente la concentración de fósforo en solución está en un rango de <0.01 mg P.L⁻¹ en suelos pobres y a 1 mg P.L⁻¹ en suelos bien fertilizados y estos niveles pueden llegar a 7 - 8 mg P.L⁻¹ en suelos recién aplicados con fertilizantes fosfatados o restos orgánicos (Thomas y Sharpley 2005).

El fósforo en la mayoría de suelos se obtiene a partir de la mineralización de la apatita Ca₁₀(X)(PO₄)₆, donde X representa F⁻, Cl⁻, OH⁻, o CO₃²⁻. Del total de fósforo en el suelo la mayoría se encuentra en sus formas más estables HPO₄²⁻ y H₂PO₄⁻, la relación entre ellos depende de la concentración de ion hidronio, a pH>7.2 predomina HPO₄²⁻ y a pH 4.0 - 7.2 predomina H₂PO₄⁻ (Juárez y Sánchez 1996, Thomas y Sharpley 2005).

En suelos neutros a calcáreos, la concentración de fosfatos en la solución del suelo se rige principalmente por la formación y disolución de fosfatos cálcicos, que a su vez dependen del

pH del suelo y de la concentración de calcio intercambiable, predominando así la fluoroapatita, hydroxiapatita, fosfato tricálcico, fosfato octocálcico y fosfato dicálcico dihidratado (Mengel y Kirkby 2001, Ferreira *et al.* 2007), y en condiciones de pH ácido el fosfato reacciona con el ion aluminio y se forman fosfatos de aluminio, tales como la berlinita (AlPO_4) o variscita ($\text{AlPO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), y cuando reacciona con hidróxidos de hierro, fosfatos de hierro, ya sea como FePO_4 o estrengita ($\text{FePO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$). Cuya estabilidad tiende a disminuir con la meteorización, y todo lo contrario para los fosfatos de aluminio (Ferreira *et al.* 2007).

En suelos neutros y ácidos, la adsorción de fosfato es el proceso dominante que afecta la disponibilidad de fósforo en las plantas, esta reacción es provocada por el intercambio de ligandos en el cual el OH^- en la superficie de adsorción es reemplazado por fosfato como se muestra a continuación:



De esta ecuación se deduce que la adsorción de fosfato es más fuerte cuanto más baja es la concentración de OH^- , es decir, más bajo es el pH del suelo (Mengel y Kirkby 2001).

En este tipo de suelos, los minerales tales como la estrengita y la variscita presentan mayor estabilidad y solubilidad que los fosfatos cálcicos, los cuales aumentan su disponibilidad y solubilidad con el aumento de pH en el suelo, dentro del rango 6 – 6.5 coexisten distintos minerales de dichos fosfatos que tienden a mantener el H_2PO_4^- en una concentración aproximada de 10^{-35} M. Por otra parte, los fosfatos de magnesio son más estables que $\text{CaHPO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (brucita) y $\text{Ca}_8\text{H}_2(\text{PO}_4)_6 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ (fosfato octocálcico), a partir de ahí se estima que son los productos iniciales de las reacciones de los fertilizantes fosfóricos (Juárez y Sánchez 1996, Ferreira *et al.* 2007).

El fósforo orgánico se encuentra en su mayoría en suelos tropicales, turbosos o forestales no cultivados. Según Juárez y Sánchez (1996) los factores que influyen en el contenido de P en la materia orgánica serán el nivel de P total de suelo, el material originario del suelo y el manejo del suelo; siendo derivados a partir de basalto o rocas ígneas básicas los que presentan mayor contenido de P orgánico. Los compuestos de este grupo que han sido identificados con mayor exactitud son los fitatos (fosfato de inositol), fosfolípidos y ácidos nucleicos. El primero representa hasta el 50 por ciento de fósforo orgánico los cuales se

encuentran unidos a estructuras más complejas como carbohidratos o proteínas, el 3 por ciento aproximadamente se encuentra como ácidos nucleicos o compuestos afines, finalmente hasta un 7 por ciento puede estar en forma de fosfolípidos derivados de restos animales, vegetales y microorganismos.

2.4.2. Formas de fósforo

En el suelo podemos encontrar el fósforo en formas activas e inactivas, cuyas concentraciones dependerán en medida al grado de meteorización del suelo (Sánchez 1981). La primera fracción corresponde a los que están retenidos superficialmente por las arcillas, óxidos, hidróxidos y carbonatos pero de rápido equilibrio con la solución suelo, estas pueden agruparse en fosfatos enlazados a calcio, fosfatos de hierro y aluminio. Los fosfatos de calcio están presentes como películas o partículas definidas, mientras que Al-P y Fe-P se presentan como películas o están adsorbidas en las superficies de arcilla y limo. La siguiente fracción, que corresponde a las formas inactivas, corresponden a las formas ocluidas y aquellas que se disuelven con la reducción química del suelo (Ferreira *et al.* 2007). Los cuales corresponden a los fosfatos de hierro y aluminio rodeados de un revestimiento inerte de otro material que evita la reacción con la solución suelo.

2.4.3. Dinámica del fósforo

La dinámica del fósforo está condicionada por procesos como la absorción de fósforo por las plantas, inmovilización y mineralización de fosfato orgánico e inorgánico, en equilibrio con calcio, compuestos de hierro y aluminio principalmente y procesos de adsorción. (Juárez y Sánchez 1996, Raij, 2011). Si consideramos un suelo con pH ácido, la dinámica del P obtenido de los fertilizantes, así como lo que se encuentran solubles se perderán principalmente por su reacción de adsorción con los elementos o compuestos presentes, formando compuestos de menor solubilidad (Tisdale 1970, citado por Hall 2008).

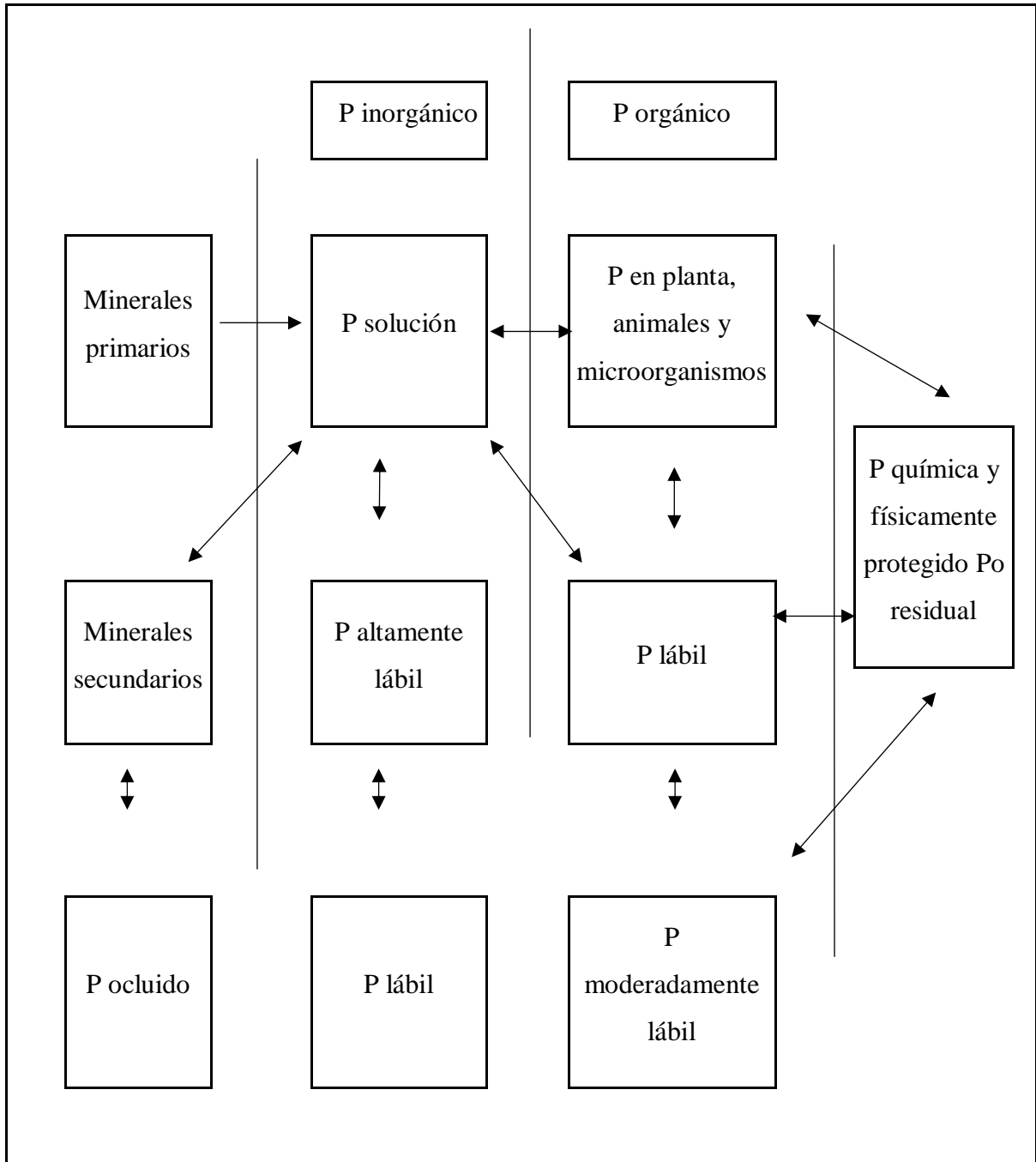


Figura 2: Modelo conceptual de las transformaciones del P en el suelo con los componentes para su determinación siguiendo el procedimiento secuencial de Tiessen y Moir (1993) citado por Fernández y Turrión (2011).

2.4.4. Extracción secuencial de fósforo

Los iones de fósforo del suelo participan en los procesos de adsorción, desorción, precipitación, disolución, mineralización e inmovilización. El objetivo de la extracción secuencial de las fracciones del P del suelo es separar las reservas de P del suelo en partes más y menos lábiles usando extractantes neutros, alcalinos, ácidos y oxidantes. Las interpretaciones de los resultados de fraccionamiento permiten comprender con éxito el destino de los fertilizantes fosfatados aplicados y el manejo de este nutriente en el suelo (Mehlich 1984, citado por Hall 2008).

El método propuesto por Chang y Jackson (1957) sirven para determinar las formas inorgánicas del P y sus transformaciones cuando se aplican fertilizantes a los suelos (Fernández y Turrión 2011). Utilizan como extractantes NH_4F y NaOH para Al-P o Fe-P. Sin embargo, Turrión *et al.* (2000) encontraron que dichos compuestos no son específicos para las formas de P que se pretende extraer y se producen reabsorciones del P que es extraído en otras fracciones, indicando que el procedimiento no logra definir claramente las fracciones de P en el suelo, además utiliza NH_4F que es un reactivo tóxico y no determina las formas orgánicas de P, las cuales pueden ser de aporte significativo de P lábil al suelo (Fernández y Turrión 2011). Dichos autores sugieren la utilización de NH_4Cl 1M para eliminar el carbonato de calcio antes de extraer los Al-P y Fe-P.

Wessel (1971) citado por Hall (2008), implementó un procedimiento de fraccionamiento para comparar las formas de fósforo de suelos no fertilizados y fertilizados similares cultivados con cacao. Reportó que la fracción extraída con NaOH tiende a ser mayor en el suelo fertilizado. Interpretó este hallazgo para indicar que los compuestos de hierro de los suelos estaban fijando el P añadido, lo que significa que los extractos de NaOH corresponden al grupo Fe-P.

Hieltjes y Lijklema (1980) (citado por Hall 2008), encontraron que el NH_4Cl 1M extraía menos, entre el 3 – 7 por ciento del ortofosfato $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{OH}$, $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$, Fe-P y Al-P hidratado. Además, encontraron que NaOH 1M extrae menos del 1 por ciento del fósforo total de $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{OH}$ y $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$, y extrae más de un 90 por ciento de Fe-P y AlPO_4 hidratado, lo que es factible para determinar esta fracción mediante el NaOH .

Hedley *et al.* (1982) (citado por Fernández y Turrión 2011), utilizaron su procedimiento de fraccionamiento para evaluar los cambios en las reservas de P en suelos cultivados en trigo durante 65 años. Con este procedimiento, encontraron que las reservas extraíbles de fósforo orgánico (Po), fósforo inorgánico (Pi) y fósforo residual (P-residual) en los suelos cultivados se agotaron en comparación con el suelo de la pradera ([P] extraído con NaOH en un 22 por ciento, con resina + NaOH + HCl en un 26 por ciento, y con H₂SO₄ + H₂O₂ en un 52 por ciento). En este procedimiento, el P inorgánico biológicamente disponible es extraído con una resina de intercambio iónico, seguido de un extractante básico NaHCO₃ 0,5 M que se utiliza para extraer las formas orgánicas e inorgánicas lábiles. Las formas insolubles de P (fosfatos de Fe y Al, apatita, compuestos orgánicos e inorgánicos insolubles) son extraídas utilizando reactivos más fuertes tales, como el NaOH y el HCl.

Olsen y Sommers (1982) (citado por Hall 2008), desarrollaron un esquema de fraccionamiento de fósforo inorgánico (Pi) para solubilizar los fosfatos presentes en algunos minerales como la apatita, strengita, variscita y goethita, se basó en el método de Chang y Jackson propuesto el 1957 con algunas modificaciones, principalmente la eliminación del NH₄F (por la sobrestimación que produce), en este método se obtiene las fracciones de P edáficas con solventes químicos selectivos, discriminando tres clases de compuestos: fosfatos de aluminio (P-Al), fosfatos de hierro (P-Fe) y fosfato cálcico (P-Ca), discriminando también entre las fracciones ocluidas y no ocluidas.

El fraccionamiento de Tiessen y Moir (1993) (citado por Subero *et al.* 2016), se basa en el principio empleado por Hedley *et al.* (1982) con la diferencia que utilizan membranas en lugar de resinas de intercambio iónico. Donde:

- La fracción extraída con membranas de intercambio aniónico corresponde al P en solución.
- La fracción de P extraíble con NaHCO₃ o P lábil considerada como rápidamente disponible para las plantas, contiene tanto fósforo inorgánico como orgánico lábiles adsorbidos en los minerales del suelo, junto con una pequeña cantidad de P microbiano. Esta fracción corresponde al Pi adsorbido al Fe y Al en la matriz de intercambio y Po-NaHCO₃ es de rápida mineralización.
- La fracción extraíble con NaOH (Pi-NaOH y Po-NaOH), considerada como un forma secundaria de P y es la fracción moderadamente disponible o lábil asociados a fosfatos

cristalinos o amorfos de Fe y Al, predominante en suelos y horizontes evolucionados, no es fácilmente asimilable y se encuentran unidos por sorción química a los óxidos de Fe y Al.

- Fracción de P extraíble con HCl 1M (P-HCl), que se corresponde con el Pi ligado al Ca o P primario y que está por lo tanto relacionado con la apatita.
- Fracción de P residual (Pi-R) es extraída con HCl concentrado, y corresponde al P primario más fuertemente unido al Ca, que no se logra extraer con el HCl 1M.
- Fracción de P extraída por digestión, la consideraron como el Po residual, de mayor fijación de las formas orgánicas, mientras señalaron esta fracción como el Po en la materia orgánica del suelo protegida por celulosa.

Para determinar la concentración de P en los extractos obtenidos, numerosos autores proponen el método colorimétrico descrito por Murphy y Riley en 1962, recomendado por la estabilidad del color azul del complejo y la tolerancia a altas concentraciones de Fe. La terminología utilizada en el fraccionamiento de P se basa en el modelo conceptual de las transformaciones de P en el suelo.

Turrión *et al.* (2000) mencionaron que el método más adecuado para predecir la disponibilidad de nutrientes en general, y de P en particular, es aquel que simula el funcionamiento de las raíces de las plantas; en tal sentido, el método de Hedley *et al.* (1982) permite separar las fracciones de P orgánicas e inorgánicas, de modo que tengan relación directa con la toma de este elemento por las plantas.

Existen desventajas con el uso de procedimientos de fraccionamiento secuencial para las comparaciones generales del suelo. En primer lugar, es el hecho de que los suelos procedentes de diversos materiales madre producirán proporciones variables de P por agente de extracción cuando todos los demás factores de formación son iguales. En segundo lugar, los resultados de la investigación de fraccionamiento secuencial no están relacionados con la disponibilidad de P para la planta o con una escala de tiempo de almacenamiento del P del suelo, dificultando el uso de la tierra. En tercer lugar, no se pueden hacer comparaciones entre las distintas teorías de extracción debido a las frecuentes modificaciones, para tener en cuenta las diferencias entre las características químicas del suelo, introducidas en los procedimientos (Hedley *et al.* 1982 citado por Hall 2008).

III. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. LUGAR DE ESTUDIO.

El ensayo se realizó en la Estación experimental “ El Choclino”, propiedad del Instituto de Cultivos Tropicales (ICT), ubicado en la latitud 6°28.734' S, longitud 76°19.694' O y 356 m.s.n.m., correspondiente a la provincia de Tarapoto en la región San Martín. La temperatura máxima promedio es de 31,2 °C, y la mínima promedio es de 20,9 °C (SENAMHI 2017).

El clima es tropical húmedo, con temperatura promedio anual (mayo 2006 – abril 2007) de 25.1°C, con precipitación anual de 1 451.7 mm.

3.2. HIPÓTESIS

Las coberturas vegetales tienen un efecto positivo sobre las fracciones de fósforo presentes en el suelo y sobre los parámetros de fertilidad evaluados.

3.3. IDENTIFICACIÓN DE COBERTURAS.

Previo al muestreo de suelos, se realizó la identificación de las coberturas en el campo de estudio, con la finalidad de disponer los tratamientos. El método seleccionado para determinar el porcentaje de cobertura fue el de cuadrantes debido a la presencia de vegetación herbácea y de cobertura, propuesto por Foster *et al.* (1995) (citado por Mostacedo y Fredericksen 2000), el cual consiste en colocar un cuadrante de 1 m² de área sobre la vegetación. Para determinar el porcentaje de cobertura, se dividió cada fotografía perpendicular al terreno en 16 áreas iguales, de manera tal que cada una represente el 6.25 por ciento del área y se evaluó el porcentaje de cobertura, siendo el 100 por ciento el espesor máximo, según la metodología propuesta por Mostacedo y Fredericksen (2000).

Para identificar las especies encontradas, se tomó en cuenta características morfológicas descriptivas (Hickey 1973, citado por Rocha *et al.* 2007): hábito de la planta, pilosidad del tallo, pilosidad de las hojas, tipo de hoja, forma del limbo, ocurrencia de la aurícula en la base del limbo.



Figura 3: Determinación de porcentaje de cobertura en un cuadrante.

Especie *Commelina diffusa*: $(0.4 + 1.0 + 0.5 + 0.7 + 0.8 + 0.5 + 1.0 + 1.0 + 0.9 + 0.5 + 1.0 + 1.0 + 0.7 + 0.8 + 0.5 + 1.0) \times 6.25 \% = 76.875 \%$.

3.4. DISEÑO EXPERIMENTAL

- Software utilizado: R Studio
- No tiene diseño experimental, pero fue evaluado como completamente al azar.
- Tratamientos: Coberturas

Cuadro 3: Coberturas identificadas en el área de estudio.

| T₁ | T₂ | T₃ |
|--------------------------|----------------------|----------------------|
| <i>Commelina diffusa</i> | Hojarasca | Parcela en descanso |

- Profundidades a evaluar

Cuadro 4: Profundidades de determinación

| P₁ | P₂ | P₃ |
|----------------------|----------------------|----------------------|
| 0-5 cm. | 5-15 cm. | 15-30 cm. |

- Parámetros evaluados:
 - a) Fraccionamiento secuencial de fósforo presente en el suelo: Fósforo soluble al agua, fosfatos de hierro y aluminio de alta solubilidad, fosfatos de hierro y aluminio de baja solubilidad, fosfatos cálcicos y fosfato estructural.
 - b) Indicadores de fertilidad química: pH, materia orgánica, calcio intercambiable, potasio intercambiable, magnesio intercambiable y fósforo intercambiable.

Cuadro 5: Parámetros evaluados.

| Fraccionamiento secuencial de fósforo | | | | | |
|--|---------------------------------|--|--|---|---------|
| P soluble | Fe-P y Al-P de alta solubilidad | Fe-P y Al-P de baja solubilidad | Ca-P | P fijado | |
| Indicadores de fertilidad química | | | | | |
| Ph | Materia orgánica (por ciento) | Ca ⁺² (cmol. kg ⁻¹) | K ⁺ (cmol. kg ⁻¹) | Mg ⁺² (cmol.kg ⁻¹) | P (ppm) |

3.5. ANÁLISIS ESTADÍSTICO

Las determinaciones de efectos significativos de las coberturas y profundidades se realizaron usando el software estadístico R Studio. Se determinaron, la significación inicial de la varianza entre los datos agrupados por tratamientos, luego por profundidades. Las comparaciones de las medias se hicieron usando el Método Tukey-Kramers HSD a un nivel alfa de 0.05.

3.6. MUESTREO DE SUELOS

Basándonos en los resultados preliminares de identificación de coberturas que sirvieron de soporte para la determinación de tratamientos; fueron tomadas 45 muestras totales, 15 muestras por cada profundidad: 0-5 cm, 5-15 cm y 15-30 cm, cada una de ellas compuesta por una mezcla de 10 submuestras tomadas con un tubo muestreador de cinco centímetros de diámetro. Dichas submuestras fueron recolectadas en zig-zag y rotuladas según su tratamiento y profundidad. Finalmente fueron secadas a estufa y molidas para ser analizadas químicamente.

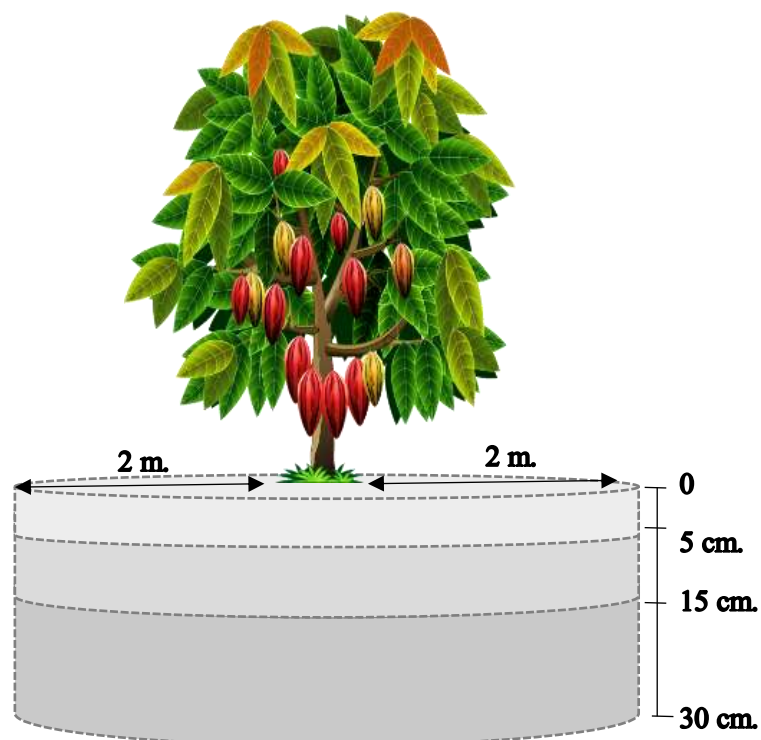


Figura 4: Ilustración de profundidades de muestreo.

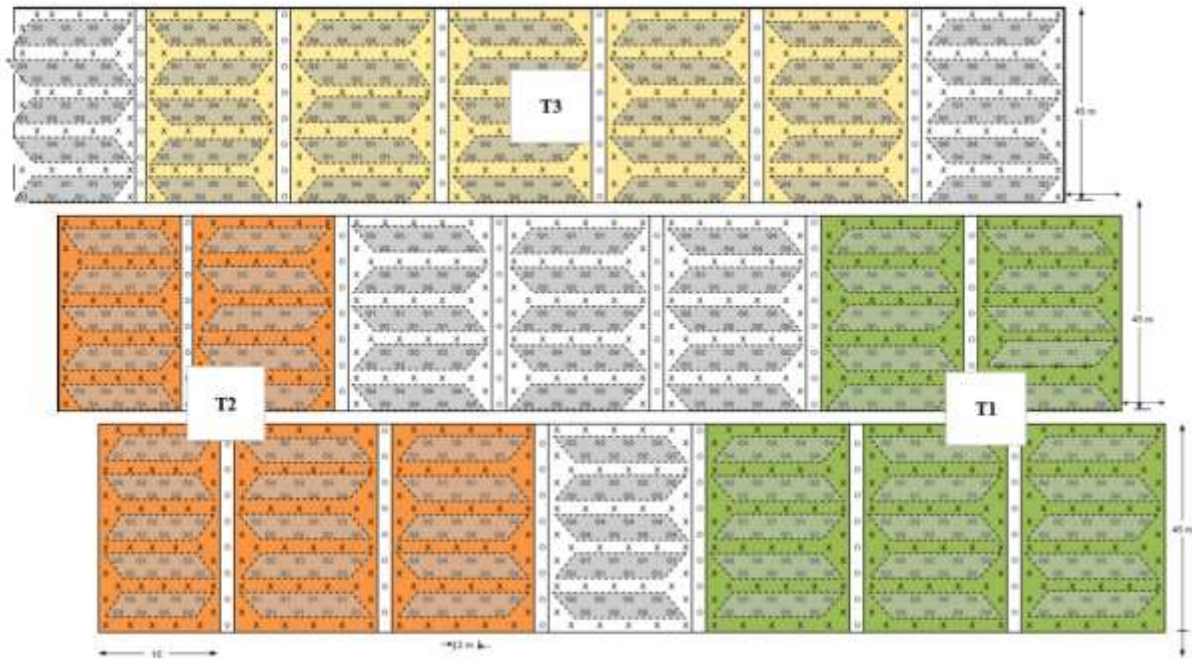


Figura 5: Croquis Experimental del sistema agroforestal de cacao (*Theobroma cacao* L.) en la Estación Experimental “El Choclino”, San Martín. Compuesto por: T1= Parcela con cobertura de commelina; T2= Parcelas con cubierta de hojarasca; T3= Parcelas en descanso.

3.7. FASE DE LABORATORIO

3.7.1 Fraccionamiento secuencial de fósforo

Se utilizó el método de fraccionamiento propuesto por Szulczewski y Li (2007) (citado por Hall 2008), el cual presenta una modificación a partir del propuesto por Nair (1995), esta modificación consiste en la adición de H₂O desionizada como primer extractante. En la Figura 6 se ilustra el procedimiento secuencial utilizado.

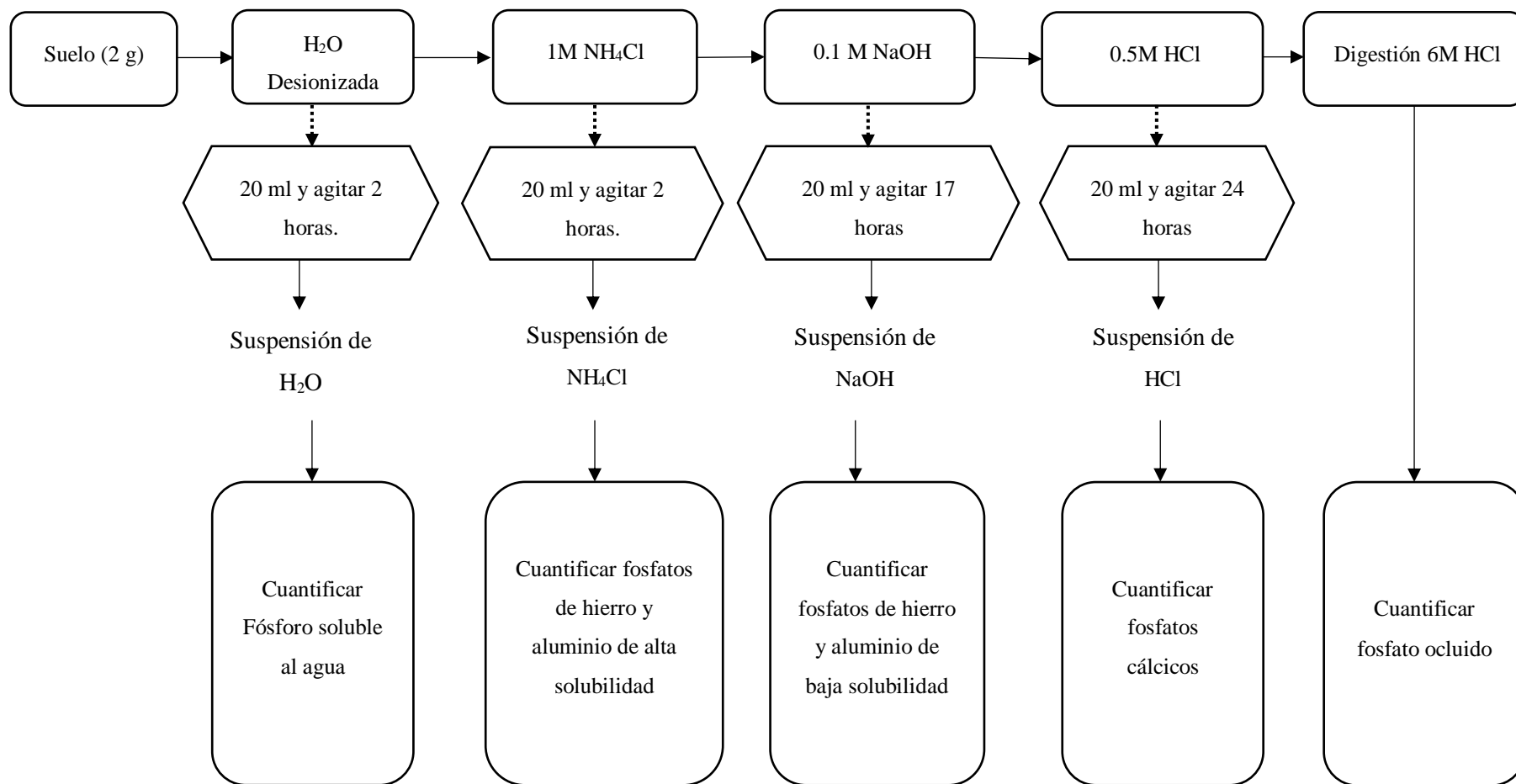


Figura 6: Flujograma de extracción secuencial de fósforo, secuencia de extractantes utilizados. El primer nivel corresponde a los extractantes y el último nivel a las formas de fósforo extraídas.

FUENTE: Adaptado de Nair *et al.* 1995

3.7.2. Determinación de pH y C.E.

Los procedimientos de determinación de indicadores de fertilidad química están basados en el manual EMBRAPA (2011). Para la determinación de la reacción del suelo (pH) y conductividad eléctrica ($\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$), primero se depositó un volumen de 10 ml de suelo en un vaso de precipitado a los cuales se le adiciona 10 ml de agua destilada (dilución 1:1) en un vaso de 100 ml. Se dejó reposar por 30 minutos y se procedió a la lectura con un potenciómetro de electrodo combinado.

3.7.3. Determinación de Ca^{+2} - Mg^{+2} - K^{+1}

Para la determinación de Ca^{+2} , Mg^{+2} y K^{+1} , primero se realizaron los estándares con las siguientes concentraciones: 15-30-45 ppm (Ca); 1-2-3 ppm (Mg) y 2-4-6 ppm (K). Para efectos del análisis se empleó 2.5 ml de tierra, se agregó 25 ml de acetato de amonio y se procedió a agitar durante 25 minutos, se filtró y luego se tomó una alícuota de 2 ml a la cual se le agregó 8 ml de agua destilada y 10 ml de lantano (La_2O_3 1 por ciento), para posteriormente, realizar la lectura por medio de un espectrofotómetro de absorción atómica (EMBRAPA 2011).

3.7.4. Determinación de fósforo inorgánico

La determinación de fósforo fue realizada con el método Olsen ($0,5 \text{ N NaHCO}_3$) y procedimientos colorimétricos con tartrato de sodio y antimonio, molibdato de amonio y ácido ascórbico en longitud de onda de 880 nm.

3.7.5. Determinación de materia orgánica




Para la determinación de materia orgánica se empleó un volumen de 1 ml de suelo y se agregó 10 ml de dicromato de potasio, luego se adicionó 10 ml de ácido sulfúrico (H_2SO_4) y después de 25 min 10 ml de ácido fosfórico (H_2PO_3) y 25 ml de agua destilada, posteriormente 4 gotas de indicador (O-fenantrolina) y se procedió a titular con $\text{FeSO}_4\cdot 7\text{H}_2\text{O}$ (EMBRAPA 2011).

IV. RESULTADOS Y DISCUSIONES

4.1. IDENTIFICACIÓN DE COBERTURAS

Luego de evaluar el porcentaje de cobertura y la diversidad de especies de las 21 parcelas experimentales, se determinaron 5 parcelas homogéneas con cobertura de hojarasca, 5 con *Commelina diffusa* y 5 parcelas en descanso o barbecho, las especies fueron identificadas en el Instituto de Cultivos Tropicales (ICT). Las 6 parcelas restantes tuvieron diferentes grados de homogeneidad de coberturas por lo cual no fueron consideradas como tratamiento dentro del modelo estadístico.

Cuadro 6: Determinación del porcentaje de cobertura por medio del método de cuadrantes. por ciento Cobertura, siendo 100 por ciento espesor máximo.

| | | |
|---|--|--|
|  |  |  |
| Cobertura: <i>Commelina diffusa</i> Porcentaje de cobertura= 75 – 100% | Cobertura vegetal muerta (hojarasca). Porcentaje de cobertura= 100 % | Cobertura: Parcelas en descanso. Predominancia de <i>Brachiaria brizantha</i> . Porcentaje de cobertura= 100% |

- Características morfológicas descriptivas de *Commelina diffusa*:

Planta de hábito prostrado, tallo y hojas poco pilosas, hoja elíptica – estrecha; espata abierta, corola con tres pétalos expandidos, polen amarillo en los estambres laterales.

- Características morfológicas descriptivas de *Brachiaria brizantha*:

Gramínea perenne, cespitosa, estolonpífera, con sistema radicular profundo. Forma macollos gruesos, que pueden alcanzar hasta 2 metros de altura posee hojas erectas, largas y levemente pilosas.

Cuadro 7: Taxonomía de especies indentificadas (EPPO 2018).

| Taxonomía | Descripción | |
|------------------|--------------------------|-----------------------------|
| Reino | Plantae | |
| Phylum | Magnoliophyta | |
| Clase | Angiosperma | |
| Categoría | Commelinids | |
| Orden | Commelinales | Poales |
| Familia | Commelinaceae | Poaceae |
| Subfamilia | - | Panicoidea |
| Género | Commelina | Brachiaria |
| Especie | <i>Commelina diffusa</i> | <i>Brachiaria brizantha</i> |

4.2. EFECTO DE LAS COBERTURAS SOBRE LOS PARÁMETROS DE FERTILIDAD EVALUADOS

Según la comparación de Tukey con un nivel de confianza de 95 por ciento se encontró diferencias significativas sobre todas las variables evaluadas, las medias que no compartan una letra son significativamente diferentes. El Cuadro 12 muestra los resultados de los parámetros evaluados, siendo la reacción del suelo de la cobertura de hojarasca mayor al pH de la cobertura de commelina y éste a su vez es mayor que el de las parcelas en descanso. La conductividad eléctrica (dS.m^{-1}) muestra diferencia significativa entre la cobertura de commelina y parcelas de descanso. Los cationes cambiabiles (calcio, magnesio y potasio) mostraron diferencias significativas, siendo la cobertura de hojarasca la que presenta mayor concentración. La presencia de fósforo disponible (ppm) reportó diferencias significativas entre la cobertura de commelina y parcelas en descanso. El porcentaje de materia orgánica indicó ser superior en la cobertura de hojarasca en comparación con las coberturas de commelina y parcelas en descanso.

Cuadro 8: Efecto de las coberturas sobre los parámetros de fertilidad evaluados.

| Cobertura | pH | C.E. (dS.m^{-1}) | Cationes cambiabiles (meq. 100 g^{-1}) | | | P disp. (ppm) | M.O. (%) |
|--------------------------|---------|--------------------------------|---|---------|---------|------------------|-------------|
| | | | Ca | Mg | K | | |
| <i>Commelina diffusa</i> | 4.713 b | 0.044 a | 2.017 b | 0.361 b | 0.066 b | 3.704 a | 1.740 b |
| Hojarasca | 4.854 a | 0.039 ab | 3.035 a | 0.557 a | 0.089 a | 3.093ab | 2.084 a |
| Parcelas en descanso | 4.647 c | 0.036 b | 1.058 c | 0.297 c | 0.057 b | 2.577 b | 1.717 b |

El suelo en estudio presenta una reacción muy fuertemente ácida (rango entre 4.5 – 5), lo cual genera condiciones que favorecen la solubilidad de hierro y saturación de aluminio intercambiable, de manera tal que el fósforo presente tiende a formar complejos de menor solubilidad, tales como variscita y estreguita como lo indica Ferreira *et al.* (2007).

Entre las tres coberturas, la de hojarasca realiza un aporte superior (2.084 por ciento) de materia orgánica en comparación con las coberturas de commelina y parcelas en descanso, lo cual implica un mayor reciclaje de nutrientes para el suelo, reflejado en las concentraciones de calcio, magnesio y potasio, que también son superiores en la cobertura de hojarasca con respecto a las otras dos coberturas, estos resultados coinciden con lo postulado por da Silva Castro *et al.* (2010) que menciona a la descomposición de la materia orgánica de la hojarasca como el principal medio de transferencias de nutrientes al suelo en un sistema agroforestal.

Madeiros (2009), menciona como parte de los beneficios de los cultivos de cobertura el aumento de la fertilidad por medio del aporte de materia orgánica; mas los resultados evidencian que no existe un reciclaje nutricional significativamente superior por parte de la cobertura de commelina con respecto a la de hojarasca, siendo la principal función de esta cobertura, proteger al suelo ante los efectos de la erosión hídrica y la disminución de la evaporación superficial.

4.3. EFECTO DE LAS COBERTURAS SOBRE LAS FORMAS DE FÓSFORO INORGÁNICO.

4.3.1. Efecto sobre el fósforo soluble en agua

Según la comparación de medias de Tukey con un nivel de confianza de 95 por ciento se encontró diferencias significativas sobre el fósforo soluble en agua en la concentración de fósforo soluble en agua, entre los tratamientos de coberturas. Siendo los valores de fósforo encontrados para las coberturas de commelina y hojarasca mayores que los encontrados para las parcelas en descanso. Se muestran los valores medios de la concentración (mg.kg^{-1}) de fósforo extraída con agua destilada, la cual corresponde al fósforo soluble al agua, las medias que no compartan una letra son significativamente diferentes (Cuadro 9).

Cuadro 9: Efecto de las coberturas sobre el fósforo soluble en agua.

| Tratamientos | Media (mg.kg ⁻¹) |
|--------------------------|------------------------------|
| Hojarasca | 1.344 a |
| <i>Commelina diffusa</i> | 1.228 a |
| Parcelas en descanso | 0.946 b |

Según los valores del Cuadro 9, podemos coincidir con lo propuesto por Raij (2011) y Juárez y Sanchez (1993), que hacen mención del movimiento lento del fósforo en el suelo, debido a su alta reactividad, movimiento por difusión y fuerza de adsorción. La diferencia entre coberturas vivas se podrían explicar en función de sus características rizoféricas, las mismas que podrían afectar la solubilidad y disponibilidad del elemento, siendo la producción de ácidos orgánicos o protones en la zona rizosférica los que permiten solubilizar compuestos de menor solubilidad hacia ortofosfato (H₂PO₄⁻) (Mengel y Kirkby 2001).

4.3.2. Efecto sobre fosfatos de hierro y aluminio de alta solubilidad

Según la comparación de medias de Tukey con un nivel de confianza de 95 por ciento no se encontró diferencias significativas sobre los fosfatos de hierro y aluminio de alta solubilidad. El Cuadro 10 muestran las concentraciones medias (mg.kg⁻¹) de los fosfatos de hierro y aluminio de alta solubilidad extraídos con NH₄Cl 1M, las medias que no compartan una letra son significativamente diferentes.

Cuadro 10: Efecto de las coberturas sobre los fosfatos de hierro y aluminio de alta solubilidad.

| Tratamientos | Media (mg.kg ⁻¹) |
|--------------------------|------------------------------|
| <i>Commelina diffusa</i> | 0.275 a |
| Parcelas de descanso | 0.249 a |
| Hojarasca | 0.218 a |

El fósforo en solución reacciona rápidamente con aluminio intercambiable e hidróxidos de hierro formando complejos de menor solubilidad, los fosfatos de hierro y aluminio extraídos con NH_4Cl 1M tienen menor fuerza de retención, justificado por la complejidad de sus enlaces. Bajo las condiciones de pH ácido, podemos coincidir con Mengel y Kirkby (2001) sobre la formación de compuestos fosfatados como la berlinita (AlPO_4).

La similitud entre los tres tratamientos se puede atribuir al grado de perturbación del subsuelo, es decir, las raíces de la commelina profundizan 10 cm y la hojarasca se encuentra en la zona superficial. Este efecto de las coberturas reduce la percolación y el abastecimiento de agua, ello determinaría un mayor almacenamiento de fosfatos de hierro y aluminio los cuales reaccionarán formando los compuestos ya mencionados con el fósforo, tal como lo indica Pound (1999).

4.3.3. Efecto sobre fosfatos de hierro y aluminio de baja solubilidad

Según la comparación de medias de Tukey con un nivel de confianza de 95 por ciento se encontró diferencias significativas sobre los fosfatos de hierro y aluminio de baja solubilidad extraídos con NaOH 0.1 M. Siendo la concentración obtenida con la cobertura de hojarasca mayor a las parcelas de descanso y estos que los de la cobertura de commelina que presentó una concentración de 11.294 (mg.kg^{-1}), las medias que no compartan una letra son significativamente diferentes (Cuadro 11).

Cuadro 11: Efecto de las coberturas sobre los fosfatos de hierro y aluminio de baja solubilidad.

| Tratamientos | Media (mg.kg^{-1}) |
|--------------------------|-------------------------------|
| Hojarasca | 14.780 a |
| Parcelas de descanso | 13.312 b |
| <i>Commelina diffusa</i> | 11.294 c |

Esta fracción corresponde a los fosfatos de hierro y aluminio de baja solubilidad, con lo cual podemos coincidir con Raij (2011) sobre la tendencia que presenta el fósforo para reaccionar con el aluminio (Al^{+3}) y el hierro (Fe) formando compuestos de menor solubilidad, tales como la variscita ($AlPO_4 \cdot 2H_2O$), que como menciona Ferreira *et al.* (2007), presentan mayor estabilidad por el grado de meteorización del suelo.

Tal como lo indica Mengel y Kirkby (2001), la adsorción de fosfato es más fuerte cuanto más baja es la concentración de OH^- , lo cual coincide con la diferencia de concentraciones de fosfatos de hierro y aluminio de alta y baja solubilidad, siendo las de baja solubilidad (las que presentan mayor fuerza de retención al suelo) mayores (Cuadro 10 y 11).

Las diferencias de la concentración de fosfatos de hierro y aluminio de baja solubilidad entre las coberturas, se justifica como la extracción por parte de la commelina y las parcelas de descanso, ambas coberturas adaptadas a condiciones de acidez, lo que permite transformar el fósforo de menor solubilidad a fósforo orgánico.

4.3.4. Efecto sobre los fosfatos cálcicos

Según la comparación de Tukey con un nivel de confianza de 95 por ciento se encontró diferencias significativas en la concentración de fosfatos cálcicos entre los tratamientos de coberturas. Siendo los valores de fósforo encontrados para la commelina y hojarasca mayores que los encontrados para las parcelas en descanso. Se muestran los valores medios de la concentración ($mg \cdot kg^{-1}$) de fosfatos cálcicos ligados a la estructura, extraído mediante HCl 0.5 M, las medias que no compartan una letra son significativamente diferentes (Cuadro 12).

Cuadro 12: Efecto de las coberturas sobre los fosfatos cálcicos.

| Tratamientos | Media ($mg \cdot kg^{-1}$) |
|--------------------------|------------------------------|
| <i>Commelina diffusa</i> | 1.613 a |
| Hojarasca | 1.471 a |
| Parcelas en descanso | 1.012 b |

Debido a la reacción muy fuertemente ácida del suelo, la concentración de fosfatos cálcicos es inferior a los fosfatos de hierro y aluminio, los cuales cuentan con mayor estabilidad, lo cual coincide con lo propuesto por Juárez y Sánchez (1996). También, debido al pH del suelo, la forma de fosfato cálcico que predominaría es fosfato monocálcico, dicha forma cuenta con mayor solubilidad, lo cual concuerda con lo señalado por Mengel y Kirkby (2001) y Ferreira *et al.* (2007), que indican que la formación de fosfatos cálcicos de menor solubilidad, como fosfatos octocálcicos o apatitas, deben contar con condiciones donde exista una alta concentración de calcio intercambiable y carbonatos.

La concentración de fosfatos cálcicos en las coberturas de hojarasca y commelina no presentaron diferencias significativas, lo cual se debe a que la cobertura de commelina no extrae fosfatos cálcicos; mientras que en las parcela de descanso, se observa extracción de esta forma de fósforo, demostrando así su rusticidad y adaptabilidad a las condiciones del suelo.

4.3.5. Efecto sobre fósforo ocluido

Según la comparación de Tukey con un nivel de confianza de 95 por ciento se encontró diferencias significativas en la concentración de fosfatos ocluidos. Siendo los valores de fósforo encontrado en la parcela de descanso mayores que los encontrados en las coberturas de hojarasca y commelina. El Cuadro 13 muestra los valores medios (mg.kg^{-1}) de fósforo extraído mediante la digestión de HCl 6 M, las medias que no compartan una letra son significativamente diferentes.

Cuadro 13: Efecto de las coberturas sobre el fosfato ocluido.

| Tratamientos | Media (mg.kg^{-1}) |
|--------------------------|-------------------------------|
| Parcelas en descanso | 50.650 a |
| Hojarasca | 29.903 b |
| <i>Commelina diffusa</i> | 29.611 b |

El fósforo estructural u ocluso (extraído mediante la digestión de HCl 6 M) se caracteriza por presentar mayor fuerza de retención a las partículas del suelo, estando en un estado no lábil lo cual coincide con lo propuesto por Tisdale (1970) sobre la tendencia que presenta dicho elemento a perderse principalmente por adsorción, y como consecuencia del proceso de la insolubilización del fosfato (Urioste *et al.* 1996 y Molina *et al.* 1999).

Además, al indicar que la forma de fósforo predominante sea el estructural, extraído por digestión con HCl 6M, coincide con lo que postulan autores como Boschetti *et al.* (2002) sobre la influencia de las prácticas de manejo sobre la solubilidad del fósforo.

4.4. EVALUACIÓN DE PARÁMETROS EVALUADOS ENTRE PROFUNDIDADES

Según la comparación de Tukey con un nivel de confianza de 95 por ciento se encontraron diferencias significativas en los parámetros de conductividad eléctrica (dS.m^{-1}), concentración (meq.100 g^{-1}) de magnesio y potasio intercambiable, fósforo disponible y porcentaje de materia orgánica; por el contrario, no se encontraron diferencias significativas en la reacción del suelo (pH) y concentración (meq.100 g^{-1}) de calcio intercambiable (Cuadro 14).

Cuadro 14: Efecto de las profundidades sobre los parámetros de fertilidad evaluados.

| Profundidad cm. | pH | C.E. (dS.m^{-1}) | Cationes cambiables (meq. 100 g^{-1}) | | | P (ppm) | M.O. (por ciento) |
|--------------------|---------|--------------------------------|---|---------|---------|---------|-------------------------|
| | | | Ca | Mg | K | | |
| 0-5 | 4.710 a | 0.055 a | 2.090 a | 0.484 a | 0.080 a | 4.695 a | 2.392 a |
| 5-15 | 4.767 a | 0.035 b | 2.085 a | 0.380 b | 0.077 a | 2.062 b | 1.798 b |
| 15-30 | 4.738 a | 0.029 c | 1.934 a | 0.352 b | 0.056 b | 2.618 b | 1.352 c |

La concentración de la materia orgánica sobre el suelo, justifican los resultados de 0 a 5 cm de profundidad de los parámetros de fósforo disponible, potasio y magnesio intercambiable, siendo la materia orgánica una fuente sustancial de nutrientes.

Podemos coincidir con Madeiros (2009) sobre la contribución de materia orgánica de los árboles del sistema que mejoran la actividad de la biota del suelo y la disponibilidad y reciclaje de nutrientes. A pesar que las raicillas del cultivo de cacao se concentran en los primeros 5 cm (ICT 2004), y las raíces de la commelina profundizan hasta los 10 cm, el depósito de hojarasca así como el equilibrio alcanzado por el sistema, permiten que los niveles de los parámetros evaluados sean mayores en la primera profundidad, lo cual coincide con Leiva (2012) que indica que la acumulación de hojarasca y su posterior descomposición beneficia el aporte de nutrientes en el suelo.

4.5. EVALUACIÓN DE FORMAS DE FÓSFORO INORGÁNICO ENTRE PROFUNDIDADES

Según la comparación de Tukey con un nivel de confianza de 95 por ciento se encontró diferencias significativas en la concentración de fósforo soluble en agua, siendo los valores de fósforo encontrados en la profundidad de 15 a 30 cm. mayores que los de 0 a 5 cm. y estos a su vez, no presentaron diferencias significativas con la segunda profundidad. La concentración de fosfatos de hierro y aluminio de alta solubilidad presentaron diferencias significativas, siendo la primera profundidad la que mostró mayor concentración en comparación con las demás profundidades. La concentración de fosfatos cálcicos reportó diferencias significativas, siendo la primera profundidad superior a las profundidades de 5 a 15 y 15 a 30 cm. Por otra parte, los fosfatos de hierro y aluminio de baja solubilidad y el fósforo fijado, no presentaron diferencias significativas en las profundidades evaluadas. Finalmente, el fósforo inorgánico total, que representa la sumatoria de las formas extraídas, mostró diferencias significativas, siendo la primera profundidad la que presentó mayor concentración sobre la profundidad de 15 a 30 cm., y esta última sobre la profundidad de 5 a 15 cm. El Cuadro 15 muestra los valores medios de la concentración (mg.kg^{-1}) de las formas inorgánicas de fósforo, las medias que no compartan una letra son significativamente diferentes.

Cuadro 15: Efecto de las profundidades sobre las formas de fósforo inorgánico.

| Profundidad (cm) | Concentración media (mg. kg ⁻¹) | | | | | |
|---------------------|---|-----------------------------------|----------------------------------|------------|------------|----------|
| | P soluble al agua | P – Fe y P-Al de alta solubilidad | P. Fe y P-Al de baja solubilidad | P-cálcicos | P - fijado | P- Total |
| 0 – 5 | 0.915 b | 0.322 a | 13.024 a | 2.087 a | 42.001 a | 54.757 a |
| 5 – 15 | 0.920 b | 0.252 b | 13.367 a | 1.118 b | 30.001 a | 45.658 c |
| 15 – 30 | 1.682 a | 0.169 c | 13.014 a | 0.891 b | 38.154 a | 53.91 b |

El hecho que el fosfato soluble al agua tenga mayor concentración en la tercera profundidad, puede indicarnos la saturación de formas de menor solubilidad en la zona superior. La concentración de fosfato de hierro y aluminio de alta solubilidad se justifica por disminución de la percolación como efecto de las coberturas (Pound 1999), lo que ocasiona la acumulación de fosfatos de hierro y aluminio en la zona superficial, que interactúan con el fósforo formando compuestos de menor solubilidad.

Los fosfatos de hierro y aluminio de baja solubilidad se encuentran en equilibrio, lo cual coincide con lo postulado por Ferreira *et al.* (2007) sobre la variscita ($\text{AlPO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), y estrengita ($\text{FePO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), que cuentan con mayor estabilidad en suelos ácidos. Del mismo modo, el fósforo fijado o estructural, no presenta diferencias significativas entre las profundidades y esto se puede justificar por la estabilidad que presente al estar fijado fuertemente al suelo.

Con respecto a los fosfatos cálcicos, estos presentaron mayor concentración de 0 a 5 cm de profundidad, lo cual coincide con la mayor concentración de Ca^{+2} cambiante ($2.090 \text{ meq.}100^{-1}$), debido al porcentaje de materia orgánica (2.392 por ciento) en esta profundidad, que evidencia uno de los beneficios de su lenta mineralización en un sistema agroforestal, tal como indica Enríquez (1985), dicho proceso permite un mayor reciclaje de nutrientes y por ende el alcance del equilibrio nutricional del sistema.

V. CONCLUSIONES

De acuerdo con las condiciones en las cuales se llevó a cabo el presente trabajo experimental y los resultados obtenidos podemos concluir en:

- 1) La forma de fósforo inorgánico predominante en las tres coberturas evaluadas corresponde al fosfato ocluido.
- 2) Existe una relación entre los parámetros de fertilidad, de pH y calcio disponible con las concentraciones de fosfatos de hierro y aluminio y fosfatos cálcicos.
- 3) Las profundidades tienen un efecto sobre las formas más solubles de fósforo (fosforo soluble al agua, fosfatos de hierro y aluminio de alta solubilidad y fosfatos cálcicos).
- 4) La cobertura de *Commelina diffusa* tiene un efecto positivo sobre la solubilidad del fósforo soluble al agua y fosfatos cálcicos. Además, es capaz de extraer fosfatos de hierro y aluminio de baja solubilidad.

VI. RECOMENDACIONES

- Utilizar esta información como base para estimar el potencial comportamiento de las formas inorgánicas de fósforo en un sistema agroforestal de cacao y la adaptación de cultivos que sirvan como cobertura.
- Utilizar la cobertura vegetal de *Commelina diffusa* en un sistema agroforestal de cacao que cuenten con características similares a los parámetros de fertilidad evaluados, por sus beneficios en la solubilidad de fosfatos cálcicos y fosfatos de hierro y aluminio de baja solubilidad.
- Continuar el trabajo de investigación, evaluando la extracción del cultivo de cacao a fin de concluir que formas inorgánicas de fósforo son lábiles para la planta.

VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BOSCHETTI, N; QUINTERO, C; BENAVIDES, R; GIUFFRE, L. 2002. Cuantificación de las fracciones orgánicas e inorgánicas de fósforo en suelos de la Mesopotamia Argentina. Ciencia del suelo 21(1). 1-8. Argentina.

CHANG, S; JACKSON, M. 1957. Fractionation of soil phosphorus. Soil Science Society of America Journal 84. 133-144.

CIDICCO. 2003. Catálogo de Abonos verdes, cultivos de cobertura (CCAV) empleados por pequeños productores de los trópicos. Honduras.

DA SILVA, M. 2010. Atributos biológicos em solo e serapilheira sobre sistemas agroflorestais de cacao e outras coberturas vegetais. Brasil. Disponible en: <http://www.uenf.br/Uenf/Downloads/PRODVEGETAL_3434_1284741501.pdf>

DA SILVA, R; PINHEIRO, M; FERNANDES, M; PICININN, J; FERREIRA, E. 2002. Conteúdo de nutrientes na serapilheira e a influência da sazonalidade em um sistema agroflorestal com queima e sem queima no nordeste paraense, bragança-pará. Universidade Federal Rural da Amazônia. Brasil. Disponible en: <<http://www.conhecer.org.br/enciclop/2010c/conteudoporcento20deporcento20nutriente.pdf>>.

EMBRAPA. 2011. Manual de Métodos de Análise de Solo. 2da ed. Brasil <https://www.agencia.cnptia.embrapa.br/Repositorio/Manual+de+Metodos_000fzvhotqk02wx5ok0q43a0ram31wtr.pdf>.

ENRÍQUEZ G. 1985. Curso sobre el cultivo del cacao. Centro Agrnómico Tropical de Investigación y Enseñanza. Ed. Agrinter Agris. Costa Rica.

EPPO Global Database. 2018. *Commelina diffusa* (COMDI). Disponible en: <<https://gd.eppo.int/taxon/COMDI>>.

FERNÁNDEZ, S; TURRIÓN, M. 2011. Fraccionamiento secuencial de fósforo en el suelo. Venezuela. Comparación de dos métodos. Disponible en: <<http://www.venesuelos.org.ve/index.php/venesuelos/article/view/127>>

FERREIRA, R; ALVAREZ, V; DE BARROS, N; FONTES, R; CANTARUTTI, R; LIMA, J. 2007. Fertilidade do solo. Sociedade Brasileira de Ciencia do Solo. Brasil.

GONÇALVES, A. 2017. La Importancia de los Sistemas Agroforestales en la Mitigación de los Gases con Efecto Invernaderos: La Experiencia de Centro Ecológico en la Región de Torres, Sur de Brasil. Centro ecológico (CE). Brasil.

HALL, H. 2008. Influence of cover crop cultivation on phosphorus fractions and soil fertility in a peruvian cacao agroforestry system. Thesis of master of science. University of Florida.

ICCO. 2017. Quarterly Bulletin of Cocoa Statistics, Vol. XLIII, No. 1, Cocoa year 2016/17.

INSTITUTO DE CULTIVOS TROPICALES (ICT). 2004. Cacao: Manejo integrado del cultivo y transferencia de tecnología en la amazonía peruana. 1ra ed. Perú.

JUÁREZ, M; SANCHEZ, A. 1996. Fósforo en la agricultura. Universidad Alicante. España.

LEIVA, E. 2012. Aspectos para la nutrición del cacao *Theobroma cacao* L. Universidad Nacional de Colombia. Disponible en: <<http://www.bdigital.unal.edu.co/50450/1/ednaivonneleivarojas.2012.pdf>>

LÓPEZ, A; VEGA, I. 2004. Cultivos de cobertura para sistemas de cultivos perennes. Universidad Nacional Agraria. Dirección de investigación, extensión y postgrado. Nicaragua. Disponible en: <<http://repositorio.una.edu.ni/2408/1/nf081864.pdf>>.

MADEIROS, L. 2009. Sistemas Agroflorestais (SAF's) na restauração de ambientes degradados. Programa de Pós-graduação em Ecologia Aplicada ao Manejo e Conservação de Recursos Naturais. Brasil.

MENGEL, K. and KIRKBY, E. 2001. Principles of plant nutrition. 5ta ed. Kluwer Academic Publishers. 453 – 463. Estados Unidos.

MINAGRI. 2014. Coberturas vegetales. Disponible en: <http://agroaldia.minagri.gob.pe/biblioteca/download/pdf/manuales-boletines/suelos/2014/suelo_cobertura.pdf>.

MINAGRI-DGPA-DEEIA. 2016. Estudio del cacao en el Perú y en el mundo. Un análisis de la producción y el comercio. Primera edición. Perú.

MOSTACEDO, B y FREDERICKSEN, T. 2000. Manual de Métodos Básicos de MUESTREO Y Análisis en Ecología Vegetal. Ed. El País. Bolivia.

NAIR, V; GRAETZ, D; PORTIER, K. 1995. Forms of Phosphorus in Soil Profiles from Dairies of South Florida. Soil Science Society of America Journal 59. 1244-1249. Estados Unidos.

PÉREZ, J; VALDÉS, E; ORDAS, V. 2012. Cobertura vegetal y erosión del suelo en sistemas agroforestales de café bajo sombra. Terra Latinoamericana. Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo, A.C. 30 (3). 249-259. México. Disponible en: <<http://www.redalyc.org/pdf/573/57325509001.pdf>>.

PICONE, L. y ZAMUNER, E. 2002. Fósforo orgánico y fertilidad fosfórica. XVIII Congreso de la Ciencia del Suelo. Informaciones Agronómicas del Cono Sur N° 16, pp.11. Argentina. Disponible en: <[http://www.ipni.net/publication/ia-lacs.nsf/0/E8E2F139150F1B6D8525799C0058C6C3/\\$FILE/nota3.pdf](http://www.ipni.net/publication/ia-lacs.nsf/0/E8E2F139150F1B6D8525799C0058C6C3/$FILE/nota3.pdf)>.

POUND, B. 1999. Cultivos de cobertura para la agricultura sostenible en América. Natural Resources Institute, Chatham, Kent, Estados Unidos. Disponible en: <<http://www.fao.org/livestock/agap/frg/agrofor1/Pound7.htm>>.

PUERTAS, F; ARÉVALO, E; ZÚÑIGA, L; LOLI, O; SOPLIN, H.; BALIGAR, V. 2008. Establecimiento de cultivos de cobertura y extracción total de nutrientes en un suelo de trópico húmedo en la amazonía peruana. UNALM. Ecología Aplicada. 7 (1,2). Disponible en: <<http://www.scielo.org.pe/pdf/ecol/v7n1-2/a04v7n1-2.pdf>>.

RABUFFETTI, A; ZAMALVIDE, J; MALLARINO, A. 2017. Manual de Fósforo. Uruguay. Disponible en: <http://www.fagro.edu.uy/fertilidad/publica/tomo_P_completo1.pdf>.

RAIJ, B. van. 2011. Fertilidade de solo e manejo de nutrientes. Editorial Piracicaba: International Plant Nutrition Institute. Brasil.

ROCHA, D; RODELLA, R; MARTINS, D. 2007. Caracterização morfológica de espécies de trapoeraba (*Commelina spp.*) Utilizando a análise multivariada. Viçosa-MG, 25 (4). 671-678. Brasil. Revisado en: <<http://www.scielo.br/pdf/pd/v25n4/a03v25n4>>.

SÁNCHEZ, L; PARRA, D; GAMBOA, E; RINCÓN, J. 2005. Rendimiento de una plantación comercial de cacao ante diferentes dosis de fertilización con NPK en el sureste del estado Táchira. Bioagro 17(2). 119-122. Venezuela.

SÁNCHEZ, P. 1981. Suelos de Trópico: características y manejo. Instituto interamericano de cooperación para la agricultura. Serie de libros y materiales educativos. Costa Rica.

SENAMHI. 2017. Boletín de monitoreo agrometeorológico de la Región San Martín. Perú.

SISTEMA INTEGRADO DE ESTADÍSTICA AGRARIA. 2016. Anuario Estadístico de la Producción Agrícola y Ganadera 2015. 212- 213. Perú.

SUBERO, N; RAMIREZ, R; SEQUERA, O; PARRA, J. 2016. Fraccionamiento de fósforo en suelos cultivados con arroz por largos períodos de tiempo: II. Relación fósforo orgánico-inorgánico. Venezuela. 28 (2) . 81-86. Disponible en: <[http://www.ucla.edu.ve/bioagro/Rev28\(1\)/2.por ciento20mspor ciento201504.pdf](http://www.ucla.edu.ve/bioagro/Rev28(1)/2.por ciento20mspor ciento201504.pdf)>.

THOMAS, S; SHARPLEY, A. 2005. Phosphorus: Agriculture and the environment. American Society of Agronomy, Inc. 53 – 60. Estados Unidos

TURRIÓN, M; GALLARDO, J; GONZÁLES, M. 2000. Distribution of P forms in natural and fertilized forest soils of the central Western Spain: plant response to superphosphate fertilization. 159-173. España.

URIOSTE, A; BONO, A; BUSCHIAZZO, D; HEVIA, G; HEPPER, E. 1996. Fracciones de fósforo en suelos agrícolas y pastoriles de la región semiárida pampeana central (Argentina). *Ciencia del suelo* 14. 92-95. Argentina.

VASCONCELLOS, C; TEIXEIRA, F; MULLER W; GONCALVES, P. 2014. Implantação do Cacaueiro em Sistemas Agroflorestais. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. 4ª ed. Brasil. Disponible en: <http://www.ceplac.gov.br/paginas/publicacoes/paginas/cartilhas_tecnicas/cartilhas/CT_18.pdf>.

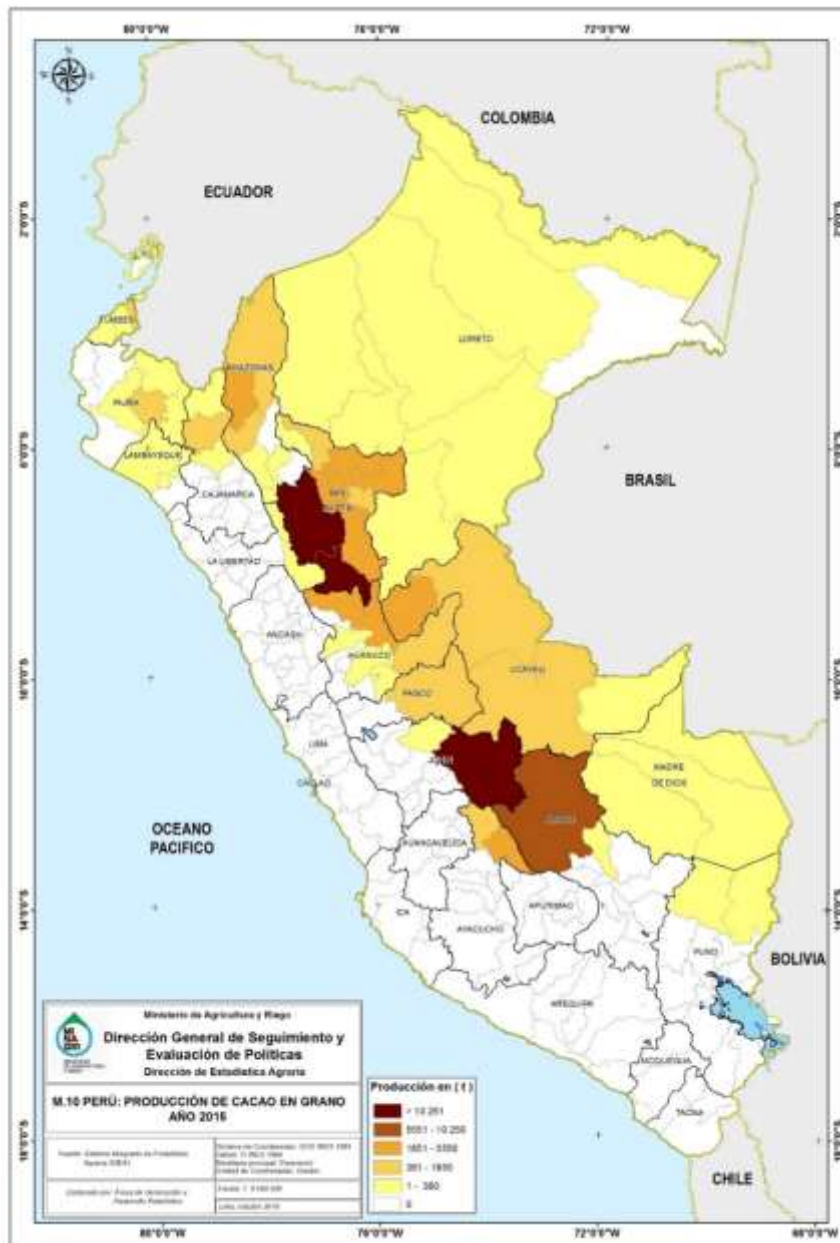
VERA; E. 1999. Sistemas Agroflorestais: conceitos e aplicações. Brasil. Disponible en: <<http://saf.cnpqg.embrapa.br/publicacoes/01.pdf>>.

WESSEL, M. 1971. Fertilizer Requirements of Cacao (*Theobroma cacao* L.) in South-western Nigeria. Ámsterdam, Holanda, Department of Agricultural Research of the Royal Tropical Institute.

YAMADA, T; STIPP, S. 2004. Fósforo na agricultura brasileira. Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP). Associação brasileira para pesquisa da potassa e do fosfato. Brasil.

VIII. ANEXOS

ANEXO 1: Áreas de producción nacional de cacao (*Theobroma cacao* L.)



FUENTE: MINAGRI (2016).

ANEXO 2: Análisis de varianza de la variable pH vs. tratamiento y profundidad (cm).

| Fuente | GL | SC Ajust. | MC Ajust. | Valor F | Valor p |
|--------------------------------|----|-----------|-----------|---------|---------|
| Tratamiento | 2 | 0.33667 | 0.168337 | 42.47 | 0 |
| Profundidad cm. | 2 | 0.02338 | 0.011692 | 2.95 | 0.065 |
| Tratamiento*Profundidad cm. | 4 | 0.02933 | 0.007333 | 1.85 | 0.141 |
| Error | 36 | 0.1427 | 0.003964 | | |
| Total | 44 | 0.53209 | | | |

ANEXO 3: Análisis de varianza de la variable conductividad eléctrica ($\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$) vs. tratamiento y profundidad (cm.).

| Fuente | GL | SC Ajust. | MC Ajust. | Valor F | Valor p |
|--------------------------------|----|-----------|-----------|---------|---------|
| Tratamiento | 2 | 0.000429 | 0.000215 | 6.43 | 0.004 |
| Profundidad cm. | 2 | 0.005707 | 0.002853 | 85.42 | 0 |
| Tratamiento*Profundidad cm. | 4 | 0.000132 | 0.000033 | 0.99 | 0.425 |
| Error | 36 | 0.001203 | 0.000033 | | |
| Total | 44 | 0.007471 | | | |

ANEXO 4: Análisis de varianza de la variable magnesio (meq.100 g⁻¹) vs. tratamiento y profundidad (cm).

| Fuente | GL | SC Ajust. | MC Ajust. | Valor F | Valor p |
|-----------------------------|----|-----------|-----------|---------|---------|
| Tratamiento | 2 | 0.55185 | 0.275924 | 62.51 | 0 |
| Profundidad cm. | 2 | 0.14442 | 0.072212 | 16.36 | 0 |
| Tratamiento*profundidad cm. | 4 | 0.05617 | 0.014044 | 3.18 | 0.025 |
| Error | 36 | 0.15892 | 0.004414 | | |
| Total | 44 | 0.91137 | | | |

ANEXO 5: Análisis de varianza de la variable potasio (meq.100 g⁻¹) vs. tratamiento y profundidad (cm.).

| Fuente | GL | SC Ajust. | MC Ajust. | Valor F | Valor p |
|-----------------------------|----|-----------|-----------|---------|---------|
| Tratamiento | 2 | 0.007796 | 0.003898 | 17.55 | 0 |
| Profundidad cm. | 2 | 0.005114 | 0.002557 | 11.51 | 0 |
| Tratamiento*profundidad cm. | 4 | 0.006346 | 0.001587 | 7.14 | 0 |
| Error | 36 | 0.007997 | 0.000222 | | |
| Total | 44 | 0.027254 | | | |

ANEXO 6: Análisis de varianza de la variable fósforo disponible (ppm) vs. tratamiento y profundidad (cm.).

| Fuente | GL | SC Ajust. | MC Ajust. | Valor F | Valor p |
|-----------------------------|----|-----------|-----------|---------|---------|
| Tratamiento | 2 | 9.546 | 4.7729 | 8.51 | 0.001 |
| Profundidad cm. | 2 | 57.79 | 28.8951 | 51.53 | 0 |
| Tratamiento*Profundidad cm. | 4 | 9.136 | 2.284 | 4.07 | 0.008 |
| Error | 36 | 20.188 | 0.5608 | | |
| Total | 44 | 96.66 | | | |

ANEXO 7: Análisis de varianza de la variable materia orgánica (por ciento) vs. tratamiento y profundidad (cm.).

| Fuente | GL | SC Ajust. | MC Ajust. | Valor F | Valor p |
|-----------------------------|----|-----------|-----------|---------|---------|
| Tratamiento | 2 | 1.2675 | 0.63375 | 19.07 | 0 |
| Profundidad cm. | 2 | 8.1751 | 4.08756 | 123.01 | 0 |
| Tratamiento*Profundidad cm. | 4 | 0.3241 | 0.08102 | 2.44 | 0.065 |
| Error | 36 | 1.1963 | 0.03323 | | |
| Total | 44 | 10.963 | | | |

ANEXO 8: Análisis de varianza de la variable fósforo soluble al agua (mg.kg^{-1}) vs. tratamiento; profundidad (cm).

| Fuente | GL | SC Ajust. | MC Ajust. | Valor F | Valor p |
|-----------------------------|----|-----------|-----------|---------|---------|
| Tratamiento | 2 | 1.2513 | 0.62566 | 10.68 | 0 |
| Profundidad cm. | 2 | 5.8485 | 2.92426 | 49.92 | 0 |
| Tratamiento*Profundidad cm. | 4 | 0.3218 | 0.08046 | 1.37 | 0.262 |
| Error | 36 | 2.1086 | 0.05857 | | |
| Total | 44 | 9.5303 | | | |

ANEXO 9: Análisis de varianza de la variable fosfato de hierro y aluminio de alta solubilidad (mg.kg^{-1}) vs. tratamiento y profundidad (cm.).

| Fuente | GL | SC Ajust. | MC Ajust. | Valor F | Valor p |
|-----------------------------|----|-----------|-----------|---------|---------|
| Tratamiento | 2 | 0.02434 | 0.01217 | 2.64 | 0.085 |
| Profundidad cm. | 2 | 0.17442 | 0.087212 | 18.95 | 0 |
| Tratamiento*Profundidad cm. | 4 | 0.04805 | 0.012013 | 2.61 | 0.052 |
| Error | 36 | 0.16569 | 0.004603 | | |
| Total | 44 | 0.41251 | | | |

ANEXO 10: Análisis de varianza de la variable fosfato de hierro y aluminio de baja solubilidad (mg.kg^{-1}) vs. tratamiento y profundidad (cm.).

| Fuente | GL | SC Ajust. | MC Ajust. | Valor F | Valor p |
|-----------------------------|----|-----------|-----------|---------|---------|
| Tratamiento | 2 | 92.862 | 46.4309 | 38.78 | 0 |
| Profundidad cm. | 2 | 1.217 | 0.6087 | 0.51 | 0.606 |
| Tratamiento*Profundidad cm. | 4 | 40.219 | 10.0548 | 8.4 | 0 |
| Error | 36 | 43.102 | 1.1973 | | |
| Total | 44 | 177.401 | | | |

ANEXO 11: Análisis de varianza de la variable fosfatos cálcicos (mg.kg^{-1}) vs. tratamiento y profundidad (cm).

| Fuente | GL | SC Ajust. | MC Ajust. | Valor F | Valor p |
|-----------------------------|----|-----------|-----------|---------|---------|
| Tratamiento | 2 | 2.958 | 1.4791 | 11.93 | 0 |
| Profundidad cm. | 2 | 12.102 | 6.0509 | 48.8 | 0 |
| Tratamiento*Profundidad cm. | 4 | 1.593 | 0.3982 | 3.21 | 0.024 |
| Error | 36 | 4.464 | 0.124 | | |
| Total | 44 | 21.117 | | | |

ANEXO 12: Análisis de varianza de la variable fósforo ocluido (mg.kg^{-1}) vs. tratamiento y profundidad (cm.).

| Fuente | GL | SC Ajust. | MC Ajust. | Valor F | Valor p |
|-----------------------------|----|-----------|-----------|---------|---------|
| Tratamiento | 2 | 4366 | 2182,8 | 11.54 | 0 |
| Profundidad cm. | 2 | 1128 | 563,8 | 2.98 | 0.063 |
| Tratamiento*Profundidad cm. | 4 | 2472 | 618,1 | 3.27 | 0.022 |
| Error | 36 | 6811 | 189,2 | | |
| Total | 44 | 14776 | | | |

ANEXO 13: Resultados de parámetros de fertilidad evaluados en la cobertura *Commelina diffusa*.

| Cobertura | Prof. cm. | pH | C.E. (dS.m^{-1}) | Cationes cambiabiles (meq.100g^{-1}) | | | P ppm | M.O. (%) |
|--------------------------|-----------|------|--------------------------------|--|-------|-------|----------|-------------|
| | | | | Ca | Mg | K | | |
| <i>Commelina diffusa</i> | 0-5 | 4.77 | 0.060 | 2.533 | 0.517 | 0.084 | 5.223 | 2.828 |
| | | 4.54 | 0.059 | 1.899 | 0.353 | 0.052 | 5.139 | 2.356 |
| | | 4.76 | 0.051 | 2.174 | 0.394 | 0.068 | 5.014 | 2.022 |
| | | 4.71 | 0.051 | 2.162 | 0.401 | 0.070 | 5.139 | 1.997 |

Continuación

| | | | | | | | | | |
|--------------------------|-----------------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| <i>Commelina diffusa</i> | 0 - 5 | 4.71 | 0.079 | 2.162 | 0.339 | 0.077 | 4.945 | 2.356 | |
| | σ | 0.1 | 0.012 | 0.226 | 0.070 | 0.012 | 0.111 | 0.337 | |
| | Media | 4.70 | 0.060 | 2.186 | 0.401 | 0.070 | 5.092 | 2.312 | |
| | cv (por ciento) | 2.0 | 19.5 | 10.3 | 17.5 | 17.0 | 2.2 | 14.6 | |
| | 5 - 15 | | 4.74 | 0.040 | 1.940 | 0.415 | 0.065 | 2.733 | 1.711 |
| | | | 4.71 | 0.043 | 1.553 | 0.330 | 0.073 | 3.943 | 1.653 |
| | | | 4.74 | 0.038 | 2.582 | 0.323 | 0.066 | 2.422 | 1.787 |
| | | | 4.71 | 0.038 | 1.883 | 0.331 | 0.066 | 2.633 | 1.690 |
| | | | 4.68 | 0.041 | 1.457 | 0.257 | 0.069 | 2.932 | 1.653 |
| | σ | 0.01 | 0.002 | 0.442 | 0.056 | 0.003 | 0.594 | 0.055 | |
| | Media | 4.72 | 0.040 | 1.883 | 0.331 | 0.068 | 2.932 | 1.699 | |

Continuación

| | | | | | | | | |
|--------------------------|-----------------|----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| <i>Commelina diffusa</i> | cv (por ciento) | 0.5 | 5.3 | 23.5 | 16.9 | 4.8 | 20.3 | 3.3 |
| | 15 – 30 | 4.67 | 0.034 | 1.989 | 0.413 | 0.051 | 3.132 | 1.397 |
| | | 4.75 | 0.032 | 1.934 | 0.362 | 0.046 | 3.042 | 1.238 |
| | | 4.73 | 0.031 | 1.934 | 0.325 | 0.061 | 3.515 | 1.210 |
| | | 4.75 | 0.031 | 2.286 | 0.362 | 0.091 | 2.706 | 1.119 |
| | | 4.75 | 0.026 | 1.764 | 0.295 | 0.057 | 3.042 | 1.085 |
| | | σ | 0.03 | 0.003 | 0.190 | 0.044 | 0.018 | 0.289 |
| | Media | 4.73 | 0.031 | 1.981 | 0.351 | 0.061 | 3.087 | 1.210 |
| | cv (por ciento) | 0.7 | 9.5 | 9.6 | 12.6 | 28.7 | 9.4 | 10.1 |

ANEXO 14: Resultados de parámetros de fertilidad evaluados en la cobertura de hojarasca.

| Cobertura | Prof. cm. | pH | C.E. | Cationes cambiabiles (meq.100g ⁻¹) | | | P | M.O. |
|-----------|-----------------|------|-----------------------|---|-------|-------|-------|-------|
| | | | (dS.m ⁻¹) | Ca | Mg | K | Ppm | (%) |
| Hojarasca | 0 - 5 | 4.76 | 0.055 | 2.851 | 0.541 | 0.063 | 6.450 | 2.993 |
| | | 4.86 | 0.048 | 1.297 | 0.631 | 0.094 | 3.950 | 2.215 |
| | | 4.90 | 0.058 | 2.595 | 0.631 | 0.073 | 3.884 | 2.581 |
| | | 4.92 | 0.053 | 2.040 | 0.535 | 0.073 | 3.950 | 2.581 |
| | | 4.84 | 0.051 | 4.193 | 0.768 | 0.105 | 3.321 | 2.589 |
| | σ | 0.06 | 0.004 | 1.074 | 0.094 | 0.017 | 1.224 | 0.275 |
| | Media | 4.86 | 0.053 | 2.595 | 0.621 | 0.082 | 4.311 | 2.592 |
| | cv (por ciento) | 1.3 | 7.0 | 41.4 | 15.2 | 21.2 | 28.4 | 10.6 |
| | 5-15 | 4.80 | 0.037 | 3.926 | 0.783 | 0.119 | 1.867 | 2.077 |
| | | 4.86 | 0.030 | 3.381 | 0.535 | 0.119 | 0.601 | 2.215 |

Continuación

| | | | | | | | | |
|-----------|-----------------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Hojarasca | 5 – 15 | 4.91 | 0.035 | 3.381 | 0.528 | 0.153 | 1.596 | 2.215 |
| | | 4.87 | 0.035 | 2.513 | 0.501 | 0.067 | 3.515 | 2.212 |
| | | 4.87 | 0.041 | 4.333 | 0.535 | 0.099 | 0.402 | 2.109 |
| | σ | 0.04 | 0.004 | 0.685 | 0.116 | 0.031 | 1.242 | 0.067 |
| | Media | 4.86 | 0.035 | 3.507 | 0.576 | 0.111 | 1.596 | 2.166 |
| | cv (por ciento) | 0.8 | 11.6 | 19.5 | 20.2 | 28.3 | 77.8 | 3.1 |
| | 15 - 30 | 4.84 | 0.030 | 3.007 | 0.542 | 0.078 | 3.773 | 1.797 |
| | | 4.88 | 0.028 | 3.236 | 0.446 | 0.073 | 3.773 | 1.311 |
| | | 4.85 | 0.021 | 3.236 | 0.389 | 0.084 | 2.112 | 1.684 |
| | | 4.82 | 0.028 | 2.479 | 0.549 | 0.076 | 3.835 | 1.495 |
| | | 4.84 | 0.031 | 3.057 | 0.446 | 0.053 | 3.373 | 1.187 |

Continuación

| | | | | | | | | |
|--|-----------------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | σ | 0.02 | 0.004 | 0.310 | 0.069 | 0.012 | 0.728 | 0.253 |
| | Media | 4.85 | 0.027 | 3.003 | 0.474 | 0.073 | 3.373 | 1.495 |
| | cv (por ciento) | 0.4 | 14.2 | 10.3 | 14.6 | 16.2 | 21.6 | 16.9 |

ANEXO 15: Resultados de parámetros de fertilidad evaluados en las parcelas en descanso.

| Cobertura | Prof. cm. | pH | C.E. | Cationes cambiabiles (meq.100g ⁻¹) | | | P | M.O. |
|----------------------|-----------|------|-----------------------|---|-------|-------|-------|-------|
| | | | (dS.m ⁻¹) | Ca | Mg | K | ppm | (%) |
| Parcelas en descanso | 0-5 | 4.52 | 0.052 | 1.488 | 0.429 | 0.091 | 6.332 | 2.305 |
| | | 4.58 | 0.041 | 1.291 | 0.355 | 0.081 | 4.331 | 2.217 |
| | | 4.62 | 0.053 | 1.560 | 0.423 | 0.087 | 3.842 | 2.305 |
| | | 4.57 | 0.048 | 1.595 | 0.475 | 0.085 | 4.682 | 2.458 |
| | | 4.61 | 0.067 | 1.505 | 0.463 | 0.086 | 4.223 | 2.077 |

Continuación

| | | | | | | | | | |
|-------------------------|--------------------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Parcelas en descanso | σ | 0.04 | 0.010 | 0.118 | 0.047 | 0.004 | 0.970 | 0.139 | |
| | Media | 4.58 | 0.052 | 1.488 | 0.429 | 0.086 | 4.682 | 2.272 | |
| | cv (por ciento) | 0.9 | 18.6 | 7.9 | 10.9 | 4.2 | 20.7 | 6.1 | |
| | 5-15 | | 4.72 | 0.028 | 0.817 | 0.245 | 0.050 | 1.738 | 1.464 |
| | | | 4.93 | 0.025 | 0.883 | 0.228 | 0.049 | 1.648 | 1.619 |
| | | | 4.67 | 0.028 | 0.883 | 0.234 | 0.054 | 1.738 | 1.490 |
| | | | 4.61 | 0.031 | 0.883 | 0.228 | 0.054 | 1.207 | 1.530 |
| | | | 4.67 | 0.030 | 0.869 | 0.216 | 0.056 | 1.952 | 1.546 |
| | σ | 0.12 | 0.002 | 0.028 | 0.011 | 0.003 | 0.275 | 0.059 | |
| | Media | 4.72 | 0.028 | 0.867 | 0.230 | 0.052 | 1.656 | 1.530 | |
| | cv (por ciento) | 2.6 | 8.2 | 3.3 | 4.6 | 5.5 | 16.6 | 3.9 | |

Continuación

| | | | | | | | | |
|-------------------------|--------------------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Parcelas en descanso | 15-30 | 4.64 | 0.028 | 0.871 | 0.251 | 0.027 | 1.392 | 1.352 |
| | | 4.60 | 0.024 | 0.784 | 0.229 | 0.026 | 1.310 | 1.348 |
| | | 4.68 | 0.027 | 0.783 | 0.231 | 0.030 | 1.336 | 1.322 |
| | | 4.56 | 0.030 | 0.818 | 0.229 | 0.049 | 1.357 | 1.380 |
| | | 4.63 | 0.029 | 0.835 | 0.216 | 0.033 | 1.567 | 1.348 |
| | σ | 0.05 | 0.002 | 0.037 | 0.013 | 0.009 | 0.102 | 0.021 |
| | Media | 4.64 | 0.028 | 0.818 | 0.231 | 0.033 | 1.392 | 1.350 |
| | cv (por ciento) | 1.1 | 8.2 | 4.5 | 5.5 | 28.3 | 7.3 | 1.5 |

ANEXO 16: Resultados de formas de fósforo inorgánico evaluados en la cobertura *Commelina diffusa*.

| Cobertura | Prof. cm. | P soluble al agua | P-Fe y P-Al de alta solubilidad | P-Fe y P-Al de baja solubilidad | P-cálcicos | P-ocluido |
|--------------------------|-----------------|-------------------|---------------------------------|---------------------------------|------------|-----------|
| <i>Commelina diffusa</i> | 0-5 | 0.895 | 0.461 | 12.076 | 2.502 | 37.408 |
| | | 1.033 | 0.185 | 13.483 | 2.673 | 30.356 |
| | | 1.033 | 0.415 | 13.717 | 3.980 | 30.356 |
| | | 1.030 | 0.415 | 12.545 | 1.706 | 38.021 |
| | | 0.797 | 0.461 | 12.076 | 2.673 | 19.663 |
| | σ | 0.107 | 0.116 | 0.778 | 0.817 | 7.409 |
| | Media | 0.958 | 0.388 | 12.779 | 2.707 | 31.161 |
| | cv (por ciento) | 11.2 | 29.9 | 6.1 | 30.2 | 23.8 |
| | 5-15 | 1.104 | 0.277 | 11.548 | 1.137 | 51.513 |
| | | 1.158 | 0.278 | 10.786 | 1.706 | 24.530 |
| | | 1.234 | 0.277 | 11.255 | 1.194 | 30.906 |
| | | 1.036 | 0.276 | 11.548 | 1.024 | 26.983 |
| | | 0.990 | 0.277 | 12.310 | 0.910 | 20.599 |
| | σ | 0.097 | 0.000 | 0.555 | 0.306 | 12.113 |
| | Media | 1.104 | 0.277 | 11.490 | 1.194 | 30.906 |

Continuación

| | | | | | | |
|------------------------------|--------------------|-------|-------|--------|-------|--------|
| <i>Commelina diffusa</i> | cv (por ciento) | 8.8 | 0.2 | 4.8 | 25.6 | 39.2 |
| | 15-30 | 1.622 | 0.092 | 10.903 | 1.024 | 24.240 |
| | | 1.702 | 0.092 | 9.379 | 0.910 | 25.756 |
| | | 1.696 | 0.162 | 9.848 | 0.938 | 36.182 |
| | | 1.602 | 0.277 | 8.969 | 0.910 | 24.240 |
| | | 1.486 | 0.185 | 8.969 | 0.910 | 23.408 |
| | σ | 0.088 | 0.077 | 0.807 | 0.049 | 5.332 |
| | Media | 1.621 | 0.162 | 9.614 | 0.938 | 26.765 |
| | cv (por ciento) | 5.4 | 47.4 | 8.4 | 5.2 | 19.9 |

ANEXO 17: Resultados de formas de fósforo inorgánico evaluados en la cobertura de hojarasca.

| Cobertura | Prof. cm. | P soluble al agua | P-Fe y P-Al de alta solubilidad | P-Fe y P-Al de baja solubilidad | P-cálcicos | P-ocluido |
|------------------|------------------|--------------------------|--|--|-------------------|------------------|
| Hojarasca | 0-5 | 1.015 | 0.369 | 13.014 | 1.962 | 55.192 |
| | | 0.752 | 0.277 | 13.600 | 1.706 | 61.325 |
| | | 1.229 | 0.300 | 13.541 | 2.729 | 53.352 |
| | | 1.028 | 0.185 | 13.131 | 1.365 | 21.536 |
| | | 1.049 | 0.369 | 14.421 | 2.047 | 47.851 |
| | σ | 0.170 | 0.077 | 0.553 | 0.505 | 15.477 |
| | Media | 1.015 | 0.300 | 13.541 | 1.962 | 47.851 |
| | cv (por ciento) | 16.8 | 25.5 | 4.1 | 25.7 | 32.3 |
| | 5-15 | 1.186 | 0.185 | 16.121 | 1.137 | 7.359 |
| | | 1.056 | 0.185 | 14.538 | 1.365 | 6.746 |
| | | 1.142 | 0.277 | 17.000 | 1.365 | 14.060 |
| | | 0.960 | 0.277 | 13.483 | 1.251 | 25.281 |
| | | 1.056 | 0.277 | 16.121 | 1.592 | 16.854 |
| | σ | 0.087 | 0.051 | 1.415 | 0.169 | 7.618 |
| | Media | 1.080 | 0.240 | 15.452 | 1.342 | 14.060 |
| | cv (por ciento) | 8.1 | 21.1 | 9.2 | 12.6 | 54.2 |

Continuación

| | | | | | | |
|-----------|-----------------|-------|-------|--------|-------|--------|
| Hojarasca | 15-30 | 2.262 | 0.115 | 15.007 | 1.024 | 28.516 |
| | | 1.758 | 0.092 | 17.234 | 0.910 | 28.516 |
| | | 2.813 | 0.092 | 15.007 | 1.251 | 41.701 |
| | | 1.090 | 0.092 | 14.655 | 1.109 | 15.918 |
| | | 1.758 | 0.185 | 15.124 | 1.251 | 24.345 |
| | σ | 0.643 | 0.040 | 1.037 | 0.148 | 9.319 |
| | Media | 1.936 | 0.115 | 15.405 | 1.109 | 27.799 |
| | cv (por ciento) | 33.2 | 34.6 | 6.7 | 13.3 | 33.5 |

ANEXO 18: Resultados de formas de fósforo inorgánico evaluados en las parcelas de descanso.

| Cobertura | Prof. cm. | P soluble al agua | P-Fe y P-Al de alta solubilidad | P-Fe y P-Al de baja solubilidad | P-cálcicos | P-ocluido |
|----------------------|-----------|-------------------|---------------------------------|---------------------------------|------------|-----------|
| Parcelas en descanso | 0-5 | 0.846 | 0.369 | 10.669 | 1.649 | 56.287 |
| | | 0.675 | 0.185 | 15.827 | 1.649 | 56.287 |
| | | 0.734 | 0.185 | 12.750 | 1.251 | 54.644 |
| | | 0.877 | 0.369 | 10.903 | 1.820 | 22.218 |
| | | 0.734 | 0.277 | 13.600 | 1.592 | 45.637 |

Continuación

| | | | | | | | |
|-------------------------|-----------------|-------|-------|--------|--------|--------|--------|
| Parcelas en descanso | σ | 0.085 | 0.092 | 2.117 | 0.209 | 14.551 | |
| | Media | 0.773 | 0.277 | 12.750 | 1.592 | 47.015 | |
| | cv (por ciento) | 11.0 | 33.3 | 16.6 | 13.1 | 31.0 | |
| | 5-15 | | 0.576 | 0.231 | 12.310 | 0.796 | 25.821 |
| | | | 0.358 | 0.277 | 13.131 | 0.853 | 45.036 |
| | | | 0.633 | 0.277 | 12.896 | 0.796 | 53.443 |
| | | | 0.709 | 0.185 | 13.160 | 0.853 | 82.266 |
| | | | 0.606 | 0.231 | 14.303 | 0.796 | 18.615 |
| | σ | 0.132 | 0.039 | 0.725 | 0.031 | 25.120 | |
| | Media | 0.576 | 0.240 | 13.160 | 0.819 | 45.036 | |
| | cv (por ciento) | 22.8 | 16.1 | 5.5 | 3.8 | 55.8 | |
| | 15-30 | | 1.654 | 0.277 | 13.483 | 0.682 | 58.247 |
| | | | 1.328 | 0.231 | 14.362 | 0.569 | 85.869 |
| | | | 1.406 | 0.277 | 14.362 | 0.682 | 49.840 |
| | | | 1.654 | 0.185 | 15.124 | 0.626 | 59.898 |
| | | | 1.406 | 0.185 | 12.779 | 0.569 | 45.637 |
| | σ | 0.154 | 0.046 | 0.906 | 0.057 | 15.667 | |
| | Media | 1.490 | 0.231 | 14.022 | 0.626 | 59.898 | |
| | cv (por ciento) | 10.3 | 20.0 | 6.5 | 9.1 | 26.2 | |

