

**VALORACIÓN DEL EFECTO DE FERTILIZANTES SOBRE LA FOSFATASA
ÁCIDA COMO INDICADOR DE LA CALIDAD DE UN SUELO
CORRESPONDIENTE A UNA MICROCUENCA DEL RÍO PIEDRAS**

ANDERSSON JULIÁN HOYOS PIAMBA

**UNIVERSIDAD DEL CAUCA
FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES, EXACTAS Y DE LA EDUCACIÓN
DEPARTAMENTO DE QUÍMICA
POPAYÁN
2010**

**VALORACIÓN DEL EFECTO DE FERTILIZANTES SOBRE LA FOSFATASA
ÁCIDA COMO INDICADOR DE LA CALIDAD DE UN SUELO
CORRESPONDIENTE A UNA MICROCUENCA DEL RÍO PIEDRAS**

ANDERSSON JULIÁN HOYOS PIAMBA

**TRABAJO DE GRADO PRESENTADO COMO REQUISITO PARCIAL
PARA OPTAR AL TÍTULO DE QUÍMICO**

**DIRECTOR
M. Sc. ISABEL BRAVO REALPE
PROFESORA TITULAR DEPARTAMENTO DE QUÍMICA**

**UNIVERSIDAD DEL CAUCA
FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES, EXACTAS Y DE LA EDUCACIÓN
DEPARTAMENTO DE QUÍMICA
POPAYÁN
2010**

Nota de Aceptación

Director

M.Sc ISABEL BRAVO REALPE

Jurado

M.Sc MAIRA ANDREA ARRIETA

Jurado

Ing OSWALDO COLLAZOS

Fecha de sustentación: Popayán, 17 de Junio de 2010

DEDICATORIA

A Dios por enseñarme el camino, ser mi guía y por estar presente en todas las personas que me aman, por darme conocimiento, sabiduría y esfuerzo para culminar esta meta.

A mis padres porque siempre me han enseñado a seguir adelante y reconozco que sin ellos no hubiese podido llevar a feliz término mi meta.

A mi papá, porque tú has sido sin duda uno de los principales precursores de este logro, nunca te desesperaste e hiciste lo imposible para que yo pudiera seguir con mis estudios, creíste que podía y siempre te preocupaste por lo que estaba haciendo y eso me mantuvo firme las veces que pude tambalear.

A mi Mama, tú también te mantuviste ahí, tú creatividad y dedicación me sacaron a camino muchas veces y tú incondicional comprensión siempre se impuso, a pesar de todo siempre me apoyaste; muchas veces no me doy cuenta y paso por alto tus esfuerzos, pero es que si te agradeciera todo lo que haces por mí no terminaría nunca.

A Lina, pues como dejarte de lado si has sido un gran apoyo, por más lejos que puedas estar, siempre te haces presente con tu cariño incondicional y con tu forma especial de ser.

AGRADECIMIENTOS

Durante este tiempo, buenos y malos momentos ayudaron a fortalecer mi carácter, me brindaron una perspectiva de la vida mucho más amplia y me han enseñado a ser más cauteloso pero sin dejar de ser auténtico. Al finalizar mis estudios de pregrado, en esta, nuestra Universidad del Cauca, existen un grupo de personas a las que no puedo dejar de reconocer debido a que durante todo este tiempo estuvieron presentes de una u otra forma evitando que me perdiera en el proceso y que saliera airoso de esta experiencia.

A mi directora: M.Sc. Isabel Bravo, a quien le agradezco la orientación y el tiempo dedicado, por brindarme sus consejos y recomendaciones en la realización de mi trabajo, por su profesionalismo y por sus valiosas enseñanzas durante mi proceso de formación personal y profesional.

Al doctor: Apolinar Figueroa, del grupo GEA por su apoyo económico y científico en el desarrollo de esta investigación.

A mis profesores, por compartir sus conocimientos, por guiarme en el camino correcto durante mi formación académica, en especial agradezco al profesor Fabio Cabezas por su profesionalismo, sus anécdotas, sus consejos y el apoyo incondicional que me brindo durante mi formación.

A los jurados, por dedicarle tiempo a la revisión de este documento.

A mis compañeros de estudio y laboratorio, Oscar, Luis Carlos, Luis Alberto, Luis Gabriel, Ángela, Cristian, Viviana, Diana, Adrian, Camilo y a todos aquellos con quienes compartí momentos y experiencias gratas en todo este camino e hicieron posible alcanzar este logro tan importante.

A Paola Sotelo, por estar en los momentos difíciles de mi vida y de mi formación académica, pero también por los buenos momentos. Tus consejos y tu preocupación por mi hicieron que no me rindiera en el camino. Gracias amiga.

A mis primos y toda mi familia, por sus consejos y apoyo en los momentos de duda y fragilidad.

CONTENIDO

	Pág.
RESUMEN	16
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	17
2. OBJETIVOS	18
2.1 Objetivo general	18
2.2 Objetivos específicos	18
3. FUNDAMENTO TEÓRICO	19
3.1 MICROCUENCA	19
3.2 EL CONCEPTO DEL SUELO	19
3.2.1 ANDISOLES	20
3.2.2 SUELOS ALTO ANDINOS	20
3.2.3 FERTILIDAD DEL SUELO	20
3.2.4 CALIDAD Y SALUD DEL SUELO	21
3.3 INDICADORES DE LA CALIDAD Y SALUD DEL SUELO	22
3.3.1 IMPORTANCIA DE LOS MICROORGANISMOS COMO INDICADORES DE LA CALIDAD Y SALUD DEL SUELO	23
3.3.2 INDICADORES BIOLÓGICOS Y BIOQUÍMICOS	23
➤ Bacterias	23
➤ Hongos	23
➤ Biomasa microbiana	24
3.4 MATERIA ORGÁNICA	25
3.4.1 LAS SUSTANCIAS HÚMICAS	25
➤ Ácidos fúlvicos	25
➤ Ácidos húmicos	25
➤ Huminas	26
3.4.2 IMPORTANCIA DE LA MATERIA ORGÁNICA PARA EL SUELO	26

	Pág.	
3.4.3	CICLO DEL CARBONO	27
3.4.4	RELACIÓN SUELO, CICLO DEL CARBONO, CALENTAMIENTO GLOBAL	27
3.4.5	MATERIA ORGÁNICA COMO INDICADOR DE LA CALIDAD DE SUELOS	28
3.5	EL FÓSFORO	29
3.5.1	FORMAS DE FÓSFORO EN EL SUELO	29
3.5.1.1	FÓSFORO INORGÁNICO	29
	➤ Fosfatos insolubles de la roca madre	29
	➤ Fosfatos precipitados o en forma de compuestos inorgánicos poco solubles	29
3.5.1.2	FÓSFORO ORGÁNICO	31
	➤ Fosfatos de inositol	31
	➤ Ácidos nucleicos	32
	➤ Fosfolípidos	32
	➤ Fosfoproteínas	33
	➤ Fosfatos metabólicos	33
3.5.2	MINERALIZACIÓN DEL FÓSFORO ORGÁNICO	34
3.6	FERTILIZANTES	36
3.6.1	TIPOS DE FERTILIZANTES	36
3.6.2	FERTILIZACIÓN	37
3.7	IMPORTANCIA DE LAS ENZIMAS DEL SUELO.	38
3.7.1	MEDIDAS DE ACTIVIDADES ENZIMÁTICAS	38
3.7.2	FOSFATASA ÁCIDA	39
3.7.3	FACTORES QUE INFLUYEN EN LA ACTIVIDAD DE LA FOSFATASA ÁCIDA	40
4.	METODOLOGÍA	41

	Pág.
4.1 UBICACIÓN GEOGRÁFICA	41
4.2 TOMA DE MUESTRA	42
4.3 CARACTERIZACIÓN FÍSICA Y QUÍMICA DEL SUELO	42
4.3.1 ANÁLISIS FÍSICOS	42
➤ Humedad	42
➤ Textura	42
➤ Densidad por el método del cilindro	43
4.3.2 ANÁLISIS QUÍMICOS	43
➤ pH	43
➤ Acidez intercambiable	43
➤ Materia orgánica	43
➤ Determinación de nitrógeno por el método de Kjeldahl	44
➤ Determinación de fósforo disponible	44
➤ Determinación de la Capacidad de Intercambio Catiónico	45
➤ Determinación de las bases intercambiables	45
➤ Determinación de los microelementos	45
➤ Evaluación de la presencia de alófanos	45
➤ Fraccionamiento de la materia orgánica	45
4.4 EVALUACIÓN DE LA FERTILIZACIÓN SOBRE LA ACTIVIDAD DE LA FOSFATASA ÁCIDA.	50
4.5 DETERMINACIÓN DE LA ACTIVIDAD ENZIMÁTICA DE LA FOSFATASA ÁCIDA	51
4.6 EVALUACIÓN DEL FÓSFORO DISPONIBLE, ORGÁNICO Y FÓSFORO TOTAL, pH Y MATERIA ORGÁNICA	52
5. ANÁLISIS DE RESULTADOS	54
5.1 ANÁLISIS FÍSICOS Y QUÍMICOS DE LOS SUELOS	54
5.2 FRACCIONAMIENTO DE LA MATERIA ORGÁNICA	56
5.3 FERTILIZACIÓN DEL SUELO	57

	Pág.	
5.4	EVALUACIÓN DEL EFECTO DE LA FERTILIZACIÓN SOBRE LA ACTIVIDAD DE LA FOSFATASA ÁCIDA COMO INDICADOR DE LA CALIDAD DE UN SUELO CORRESPONDIENTE A LA MICROCUENCA ARRAYANALES DEL RÍO PIEDRAS	58
5.5	RELACIÓN DEL ESTADO DE HUMIFICACIÓN CON LA ACTIVIDAD DE LA FOSFATASA ÁCIDA	66
5.6	EVALUACIÓN DEL EFECTO DE LA FERTILIZACIÓN SOBRE PARÁMETROS QUÍMICOS DEL SUELO	67
5.6.1	Efecto de la fertilización sobre el pH en función del tiempo	67
5.6.2	Efecto de la fertilización sobre el nivel del P disponible en función del tiempo	69
5.6.3	Efecto de la fertilización sobre el nivel del P orgánico en función del tiempo	72
5.6.4	Efecto de la fertilización sobre el nivel del P Total en función del tiempo	75
5.6.5	Efecto de la fertilización sobre la MO en función del tiempo	77
5.7	CORRELACIÓN DE LA AFA CON OTROS PARÁMETROS	79
6.	CONCLUSIONES	81
7.	BIBLIOGRAFÍA	84
	ANEXOS	91

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
Anexo 1. Parámetros de comparación para niveles de fertilidad en suelos de clima medio (SCCS. 2000)	91
Anexo 2. Tratamiento estadístico	92
Anexo 3. Valores de la actividad de la fosfomonoesterasa	99

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Estructura del hexafosfato de inositol	31
Figura 2. Representación de los ácidos nucleicos	32
Figura 3. Fórmula general de los fosfolípidos	33
Figura 4. Estructura de la Lecitina	33
Figura 5. Proceso de mineralización e inmovilización del fósforo	34
Figura 6. Ubicación geográfica del sitio de muestreo	41
Figura 7. Diagrama de separación granulométrica de la MO	47
Figura 8. Extracción de las sustancias húmicas	48
Figura 9. Floculación de arcillas	49
Figura 10. Separación de los ácidos húmicos y fracción fúlvica	49
Figura 11. Diagrama de diseño experimental para la evaluación del efecto de la fertilización sobre la actividad de la fosfatasa ácida.	50
Figura 12. Diagrama del proceso para la determinación de la fosfatasa ácida	51
Figura 13. Proceso para la determinación de fósforo orgánico	52
Figura 14. Diagrama del proceso para la determinación de fósforo total	53
Figura 15. Efecto de la fertilización sobre la actividad de la fosfatasa ácida en función del Tiempo	59
Figura 16. Comportamiento de la humedad de cada tratamiento en función del tiempo.	60

	Pág.
Figura 17. Efecto de la fertilización sobre el pH	67
Figura 18. Efecto de la fertilización sobre el P disponible	70
Figura 19. Efecto de la fertilización sobre el P orgánico	73
Figura 20. Efecto de la fertilización sobre el P Total	75
Figura 21. Efecto de la fertilización sobre la MO	21

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Principales formas de fosfato inorgánico	30
Tabla 2. Análisis Físico y Químico del Suelo	54
Tabla 3. Porcentaje de materia orgánica fresca y humificada	56
Tabla 4. % CO, % MO de las sustancias húmicas y grado de humificación de la MOH	56
Tabla 5. Dosis necesaria de fertilizante para alcanzar 30 ppm de P disponible	57
Tabla 6. Efecto de la fertilización sobre la actividad de la fosfatasa ácida	58
Tabla 7. Comportamiento de la humedad de cada tratamiento en función del tiempo	59
Tabla 8. Prueba Duncan para AFA en función del tratamiento para cada tiempo	63
Tabla 9. Prueba Duncan para AFA en función del tratamiento para el tiempo 1 y 2	64
Tabla 10. Correlación de Pearson para la AFA, humedad y tratamiento	64
Tabla 11. Prueba Duncan para AFA en función del tiempo	65
Tabla 12. Efecto de la fertilización sobre el pH	67
Tabla 13. Prueba de Tukey para el pH en función del tratamiento	68
Tabla 14. Prueba de Tukey para el pH en función del tiempo	69
Tabla 15. Efecto de la fertilización sobre el P disponible	69
Tabla 16. Prueba de Tukey para P disponible en función del tiempo y tratamiento	71
Tabla 17. Efecto de la fertilización sobre el P orgánico	72

	Pág.
Tabla 18. Prueba de Tukey para el P orgánico en función del tratamiento	74
Tabla 19. Prueba de Duncan para el P orgánico en función del tiempo	74
Tabla 20. Efecto de la fertilización sobre el P Total	75
Tabla 21. Prueba de Duncan para el P Total en función del tratamiento y tiempo	76
Tabla 22. Efecto de la fertilización de sobre la MO	77
Tabla 23. Prueba de Duncan para la MO en función del tiempo	78
Tabla 24 Correlación de la AFA con otros parámetros	79

LISTA DE ACRÓNIMOS

AFA	Actividad de la fosfatasa ácida
AH	Ácidos húmicos
CIA	Capacidad de intercambio aniónico
CIC	Capacidad de intercambio catiónico
CO	Carbono orgánico
Coef	Coefficiente de correlación
FF	Fracción fúlvica
H	Huminas
%HA	Porcentaje de ácidos húmicos
HI	Índice de Sequi
HR	Relación de humificación
HR1	Grado de humificación
MO	Materia orgánica
MOF	Materia orgánica fresca
MOH	Materia orgánica humificada
MOS	Materia orgánica del suelo
m.s.n.m	Metros sobre el nivel del mar
MUB	Buffer universal modificado a pH 6,5
P	Fósforo
Pi	Fósforo inorgánico
p-NF	p-nitrofenil
p-NFF	p- nitrofenil fosfato
Po	Fósforo orgánico
ppm	Partes por millón
SH	Sustancias húmicas
Sig	Significancia
T1	Suelo testigo
T2	Suelo fertilizado con Triple 15
T3	Suelo fertilizado con KH_2PO_4

RESUMEN

Este estudio, fue realizado en el laboratorio de Agroquímica de la Universidad del Cauca, entre noviembre de 2009 y febrero de 2010, valoró el efecto de dos fertilizantes, Triple 15 y fosfato diácido de potasio, sobre la actividad enzimática de la fosfatasa ácida como indicador de la calidad de un suelo correspondiente a una microcuenca del río Piedras.

La muestra de suelo para este estudio, fue colectada en la finca Sardina correspondiente al Grupo Sardina que agrupa ocho familias de la microcuenca Arrayanales del Río Piedras en la vereda Quintana, Corregimiento Quintana, Municipio de Popayán.

Se seleccionó como indicador bioquímico la actividad de la fosfatasa ácida, porque el suelo seleccionado es fuertemente ácido y presenta serias deficiencias de fósforo; además es un suelo alto andino cuyo uso ha sido cambiado a labores de pastoreo, en donde se observa un alto grado de compactación y una disminución en la profundidad del horizonte A. En suelos aledaños se tienen cultivos de papa en los cuales para suplir la deficiencia de P se aplican fertilizantes, afectando así sus propiedades e influyendo en la actividad de las enzimas tales como las fosfatasas. El interés sobre las mismas radica en la importancia del fósforo en la nutrición de las plantas y en su severa deficiencia.

La actividad de la fosfatasa ácida se determinó de acuerdo al método colorimétrico implementado en el laboratorio de Agroquímica de la universidad del Cauca de acuerdo al método descrito por Tabatabai (1994)[1], el cual emplea como sustrato p-nitrofenilfosfato 0.05M a pH 6.5.

Se utilizó un diseño experimental factorial de bloques, donde el factor o variable independiente fue el fertilizante con dos niveles, proveniente de dos fuentes: Triple 15 y fosfato diácido de potasio, con una dosis cada uno, con tres períodos de incubación y cinco réplicas por tratamiento, incluyendo un testigo absoluto, para un total de 45 tratamientos. Las variables dependientes fueron la actividad de la fosfatasa ácida, el P disponible, el P orgánico, el P total, el pH y la materia orgánica. Se encontró que efectivamente los fertilizantes aplicados disminuyen la AFA entre un 8 y 43% e influyen en la reacción del suelo generando acidez al medio, incrementando los niveles de P orgánico y disponible, pero no producen cambios significativos en la MO en el tiempo de estudio, siendo mayor el efecto del Triple 15. Desde el punto de vista ambiental, es preferible utilizar la fuente de KH_2PO_4 porque el Triple 15 genera más acidez al suelo, y en estas condiciones es posible generar gases efecto invernadero por la fuente de N que él presenta.

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La deficiencia de P disponible en suelos andisoles Caucanos ha sido ampliamente detectada y es causada generalmente por su fuerte acidez, en donde el P sufre diferentes procesos de adsorción. Para suplir tal deficiencia, los agricultores aplican altas y frecuentes dosis de fertilizantes y cal, volviéndose insostenible la producción, generando contaminación a las diferentes fases ambientales, alterando las condiciones normales de estos suelos y afectando su actividad microbiana.

El P en el suelo se encuentra en forma orgánica y en forma inorgánica, predominando la primera fracción, a partir de la cual por mineralización se libera el P disponible para las plantas. Su mineralización es catalizada por enzimas fosfatasas producidas por los microorganismos, que hidrolizan compuestos como ésteres de fosfato a fosfato inorgánico. La actividad de estas enzimas está sujeta a la influencia de varios factores como la adición de fuentes de P soluble al suelo, impidiendo de esta manera la mineralización de compuestos orgánicos y generando la acumulación de grandes capas de MO en el suelo con la consecuente producción de más acidez.

El protocolo de Kioto reconoce que el mal uso del suelo, contribuye a las emisiones netas de de carbono hacia la atmosfera incrementando de esta manera el efecto del calentamiento global y la degradación de este recurso. La actividad antropogénica en suelos de páramos afecta sus condiciones naturales, como se observa a simple vista procesos de erosión y degradación, por el cambio de uso de suelo mediante pastoreo intensivo.

Las variaciones en el contenido de MO debido a las actividades antropogénicas o naturales, son generalmente consideradas como uno de los indicadores primarios de la calidad del suelo, tanto en sus funciones agrícolas como ambientales; sin embargo, estas variaciones no son significativas a corto plazo. La actividad enzimática es una de las numerosas formas de medir la calidad del suelo y el valor bioindicativo de la actividad de la fosfatasa ácida puede servir como un índice de susceptibilidad a factores de estrés. No se conocen estudios realizados en el Departamento del Cauca, que correlacionen la actividad de la fosfatasa ácida con la disponibilidad del P, ni el efecto que produce la fertilización sobre la actividad de dicha enzima, teniendo en cuenta que esta práctica es muy usual en nuestra región, se presenta este estudio.

2. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GENERAL

Evaluar el estado de humificación de la MO de un suelo de una microcuena del Río Piedras y el efecto de la fertilización proveniente de dos fuentes de fósforo sobre la actividad de la fosfatasa ácida y sobre otras propiedades físicas y químicas de dicho suelo.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Caracterizar física y químicamente el suelo proveniente de la vereda Quintana del corregimiento Quintana municipio Popayán.
- Evaluar el grado de humificación de la MO de dicho suelo.
- Determinar el P necesario para alcanzar un nivel óptimo en el suelo objeto de estudio.
- Evaluar el efecto de los fertilizantes Triple 15 y fosfato diácido de potasio sobre la actividad de la fosfatasa ácida.
- Evaluar la correlación entre la actividad de la fosfatasa ácida con el P disponible, P orgánico, P total, el pH y la MO.

3. FUNDAMENTO TEÓRICO

3.1 MICROCUENCA

Una microcuenca es la unidad más pequeña de un paisaje. Es lo suficientemente grande como para cubrir la totalidad de los componentes que interactúan: atmósfera, vegetación, plantas, suelos, aguas y roca madre. El tamaño mínimo de la zona de captación debe generar una corriente permanente.

Los flujos de elementos en la microcuenca se asocian con la erosión de la roca; precipitación de la atmósfera; entradas antropogénicas de insumos (la fertilización); aguas de escorrentía; erosión mecánica debido a la producción de partículas en suspensión, exportación de biomasa (tala, recolección); deposición de partículas y gases. La microcuenca es un ecosistema terrestre con un conjunto de organismos vivos que interactúan de manera compleja entre sí y con su entorno [1].

3.2 EL CONCEPTO DE SUELO

Hay muchos conceptos de suelo dependiendo del ángulo y enfoque que se le dé al mismo. Sin embargo, resumiendo todos ellos podemos llegar al siguiente: *“Suelo: Es un ente natural, tridimensional, trifásico, dinámico, sobre el cual crecen y se desarrollan la mayoría de las plantas”* [2].

Es un ente, porque tiene vida; tridimensional, porque es visto a lo largo, ancho y profundidad; trifásico, porque existe fase sólida, líquida y gaseosa; dinámico, porque dentro del suelo ocurren procesos que involucran cambios físicos y reacciones químicas constantemente [2].

Las tres fases del suelo coexisten en un estrecho equilibrio. La fase sólida está constituida principalmente por sustancias inorgánicas de diferente composición química, algunas de ellas son mezclas de compuestos denominadas rocas, cuya meteorización conduce a los minerales primarios y secundarios formadores del suelo. La fase líquida se define como una solución que posee equilibrio de electrolitos, de gran importancia para la nutrición de las plantas, en ella se encuentran presentes todos los nutrientes necesarios para los diferentes cultivos como nitrógeno, fósforo, potasio, calcio, magnesio, azufre, cobre, cinc, hierro, manganeso, entre otros; también contiene moléculas orgánicas solubles de peso molecular reducidas. Las concentraciones de estos elementos en la solución del suelo dependen de sus propiedades físicas y químicas, como de la presencia y solubilidad de sus componentes inorgánicos y orgánicos, temperatura y presión de los diferentes gases en su atmósfera. La fase gaseosa ocupa volúmenes que oscilan de cero al 45% del volumen total. Sus componentes principales son los mismos que los del aire en la atmósfera: nitrógeno, oxígeno, dióxido de carbono, vapor de agua y los gases inertes [3].

3.2.1 ANDISOLES

Los suelos andisoles en Colombia están ampliamente distribuidos en la región andina del país, especialmente en la cordillera central, en las cordilleras occidental y oriental también se presentan pero en menor proporción.

Los suelos de Ando, se desarrollan a partir de una amplia gama de depósitos de cenizas volcánicas. Estos suelos, fundamentalmente consisten en un horizonte A pardo oscuro a negro, de 30 cm aproximadamente de espesor, estructura grumosa y granular fina, con un contenido de materiales orgánicos hasta del 30 % en los miembros más oscuros del grupo. Las propiedades ándicas resultan principalmente de la presencia de cantidades significativas de complejos aluminohumus de alofana, imogolita y ferrihidrita. Los materiales amorfos se forman durante el intemperismo y de otros materiales parentales con contenidos significativos de vidrio volcánico. El intemperismo y la transformación mineral, son los procesos dominantes en los andisoles, las translocaciones y acumulaciones de los compuestos translocados generalmente son mínimos, sin embargo, puede producirse migración de la materia orgánica complejada con aluminio, bajo condiciones determinadas por la naturaleza de las sustancias húmicas y del componente mineral ^[4].

3.2.2 SUELOS ALTO ANDINOS

Todos los animales, plantas y demás seres tejen una trama de vida que se delimita de acuerdo con formaciones vegetales, climas, cambios de temperatura, tipo de suelo, lluvia y altura. Cada uno tiene funciones que le definen. Una forma privilegiada y única al paisaje. Tanto desde el punto de vista climático, geológico, edáfico e hídrico, como teniendo en cuenta las regiones naturales, formaciones vegetales, provincias biogeográficas y zonas de vida entre otros ^[5].

Para definir las características de estas áreas existen metodologías con diversos criterios que permiten identificarlas, como lo son: las condiciones bioclimáticas y las formas de vida, que permiten clasificarlas haciendo énfasis en la ubicación en pisos térmicos ^[5].

los ecosistemas alto andinos se caracteriza por estar ubicado entre los 2200 y 3000 m.s.n.m. correspondiente a bosques nublados productores de agua. Las especies que conforman el estrato superior son variadas, dominando el granizo y el tuno ^[5].

3.2.3 FERTILIDAD DEL SUELO

La fertilidad de un suelo se define como su capacidad para proporcionar a las plantas un medio físico, que permita su establecimiento, desarrollo y que suministre, en cantidad y forma adecuada, los nutrimentos que necesitan para

satisfacer sus necesidades durante toda su existencia. Las propiedades químicas, físicas, biológicas y climáticas que actúan normalmente en interacción, son las que identifican la fertilidad de los suelos. Entre estos factores, quizás los componentes biológicos sean los últimos que se han tomado en cuenta en investigación y producción de los cultivos, además hoy se acepta que la actividad de los microorganismos no solo es un factor clave en la fertilidad del suelo, sino que también lo es en la estabilidad y funcionamiento de ecosistemas naturales como los agroecosistemas [6].

En lo referente al suministro de condiciones óptimas para el asentamiento de las plantas, estas características no actúan independientemente, sino en armónica interrelación, que en conjunto determinan la fertilidad del suelo. Por ejemplo, un suelo puede estar provisto de suficientes elementos minerales –fertilidad química– pero que no está provisto de buenas condiciones físicas y viceversa [2].

3.2.4 CALIDAD Y SALUD DEL SUELO

La calidad y la salud del suelo son conceptos equivalentes, no siempre considerados sinónimos. La calidad debe interpretarse como la utilidad del suelo para un propósito específico en una escala amplia de tiempo. El estado de las propiedades dinámicas del suelo como el contenido de materia orgánica, diversidad de organismos, o productos microbianos en un tiempo particular constituye la salud del suelo [6].

La calidad del suelo abarca tres componentes básicos: las características biológicas, las físicas y las químicas; mientras que la salud está determinada principalmente por sus características ecológicas. Un ecosistema saludable está definido por la integración de los ciclos de los nutrientes y flujos de energía, y por la estabilidad y elasticidad frente a una alteración o estrés. Sin embargo, las propiedades que se utilizan como indicadores de calidad no necesariamente están directamente relacionadas con la salud. En general la respuesta de los suelos y de los ecosistemas a una alteración tiene dos componentes: resistencia y resiliencia. La resistencia, es la capacidad inherente del sistema para tolerar la alteración; la resiliencia, es la capacidad amortiguadora y la habilidad para regenerarse. Por otro lado, la biodiversidad es una propiedad que condiciona la capacidad de recuperación del sistema edáfico ante una alteración y de mantener su estabilidad funcional, hay evidencias de la relación que existe entre los organismos que habitan en el ecosistema (diversidad, estructura de la cadena trófica, estabilidad de las comunidades) y la elasticidad de un suelo, pero se conoce muy poco acerca de cómo la biodiversidad asegura la continuidad de funciones específicas [7].

Las definiciones más recientes de calidad del suelo se basan en la multifuncionalidad del suelo y no sólo en un uso específico, pero este concepto continúa evolucionando. Estas definiciones fueron sintetizadas por el Comité para Salud del Suelo de la Soil Science Society of America como la capacidad del

suelo para sostener la productividad de los cultivos, el mantener la calidad del agua y del aire, y el proporcionar condiciones saludables para plantas, animales y el hombre dentro de los límites de un ecosistema ^[7] ^[8]. Por consiguiente, la calidad y salud de este recurso determina la sostenibilidad de la agricultura, la calidad ambiental y como consecuencia la salud de plantas, animales y del hombre. Al utilizar la salud y la calidad como herramientas para evaluar la sostenibilidad es necesario tener en cuenta las escalas espacio temporales, las cuales dependen de las propiedades inherentes (asociadas con los factores formadores) y de las propiedades dinámicas (que pueden ser afectadas por acciones humanas), ya que el recurso suelo y los ecosistemas que soporta son dinámicos en el espacio y el tiempo, lo cual acarrea limitaciones e incertidumbres acerca del conocimiento que de éstos tenemos ^[7].

3.3 INDICADORES DE LA CALIDAD Y SALUD DEL SUELO

A pesar de la creciente preocupación acerca de la degradación del suelo, de la disminución en su calidad y su impacto en el bienestar de la humanidad y el ambiente, aún hay criterios universales para evaluar los cambios en la calidad del suelo. Para hacer operativo este concepto, es preciso contar con variables que puedan servir para evaluar la condición del suelo. Estas variables se conocen como indicadores, pues presentan una condición y proporcionan información acerca de los cambios o tendencias de esa condición ^[8]. Según Adriaanse (1993) los indicadores son instrumentos de análisis que permiten simplificar, cuantificar y comunicar fenómenos complejos. Los indicadores de la calidad del suelo pueden ser propiedades físicas, químicas y biológicas, o procesos que ocurren en él ^[9].

Hünнемeyer *et al.* (1997) establecieron que los indicadores deberían permitir: (a) analizar la situación actual e identificar los puntos críticos con respecto al desarrollo sostenible; (b) analizar los posibles impactos de una intervención; (c) monitorear el impacto de las intervenciones antrópicas; y (d) ayudar a determinar si el uso del recurso es sostenible ^[10].

Para que las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo sean consideradas indicadores de calidad deben cubrir las siguientes condiciones ^[6]:

a) Describir los procesos del ecosistema; b) integrar propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo; c) reflejar los atributos de sostenibilidad que se quieren medir; d) ser sensitivas a variaciones de clima y manejo; e) ser accesible a muchos usuarios y aplicables a condiciones de campo; f) ser reproducibles; g) ser fáciles de entender; h) ser sensitivas a los cambios en el suelo que ocurren como resultado de la degradación antropogénica; i) y, cuando sea posible, ser componentes de una base de datos del suelo ya existente ^[6] ^[7] ^[8].

3.3.1 IMPORTANCIA DE LOS MICROORGANISMOS COMO INDICADORES DE LA CALIDAD DE SUELOS

La fertilidad y el funcionamiento de los suelos dependen en una gran proporción de las propiedades bioquímicas y microbiológicas, ya que son muy importantes para definir las principales funciones edáficas: productiva, filtrante y degradativa. Por lo tanto, la actividad biológica y bioquímica del suelo es de importancia capital en el mantenimiento de la fertilidad de los hábitats terrestres y consecuentemente del funcionamiento de los ecosistemas forestales y agrícolas ^[6].

3.3.2 INDICADORES BIOLÓGICOS Y BIOQUÍMICOS

Bacterias:

Expresa el número de unidades formadoras de colonias por gramo de suelo. Es un indicador que refleja la población potencial de las bacterias en un determinado suelo, especialmente aquellas que ocupan diferentes nichos o hábitats en forma saprofítica. La función básica de las bacterias es la descomposición y mineralización de los residuos orgánicos, de donde obtienen su fuente energética y alimenticia. Mediante su metabolismo liberan al medio sustancias como enzimas, proteínas, reguladores de crecimiento, metabolitos y algunos nutrientes. Los beneficios de las bacterias para los cultivos se relacionan con un incremento en la cantidad de raíces y un aporte importante de elementos básicos para el desarrollo y producción ^[6] ^[11].

El número de bacterias tiene una estrecha relación con algunas propiedades físicas del suelo, como la textura, estructura, porosidad, aireación y retención de humedad, ya que su actividad se beneficia con una mayor disponibilidad de oxígeno, principalmente en aquellos suelos con poca compactación y sin excesos de agua ^[6].

Dentro de las propiedades químicas que favorecen la actividad de las bacterias se encuentra: pH cercano a la neutralidad, baja acidez, altos contenidos de materia orgánica y alta disponibilidad de algunos elementos necesarios para su metabolismo, como N, Ca²⁺ y Mg²⁺ ^[6].

También es importante tomar en cuenta los factores que pueden afectar negativamente las poblaciones de bacterias, dentro de éstos está la presencia de otros organismos antagónicos y de sustancias contaminantes en el suelo, así como la aplicación de agroquímicos ^[6].

Hongos:

Son indicadores que reflejan la población potencial de los hongos en un determinado suelo (unidades formadoras de colonias por gramo del sustrato), especialmente aquellos que ocupan diferentes nichos o hábitats en forma saprofítica ^[6].

La función básica de los hongos es la descomposición y mineralización de los residuos orgánicos frescos o recién incorporados al suelo, por esto se les conoce como descomponedores primarios que mediante su metabolismo liberan gran cantidad de enzimas capaces de destruir compuestos de estructuras complejas, para así obtener su fuente energética y alimenticia. Además liberan al medio proteínas, reguladores de crecimiento, metabolitos y algunos nutrientes. Los beneficios de los hongos para los cultivos se relacionan con un incremento en la cantidad de raíces, una protección al ataque de fitopatógenos y un aporte importante de elementos básicos para el desarrollo y producción [6].

Al igual que las bacterias y actinomicetos, la disponibilidad de oxígeno en el medio es importante, ya que el número de hongos del suelo tiene una estrecha relación con propiedades físicas relacionadas con la función filtrante del suelo: textura, estructura, porosidad, aireación y retención de humedad. En cuanto a parámetros químicos, se favorece la actividad de los hongos a un pH del suelo medianamente ácido, una acidez intercambiable intermedia, altos contenidos de materia orgánica y alta disponibilidad de elementos esenciales. Organismos antagonistas y sustancias contaminantes son factores que también afectan la actividad de los hongos en el suelo [6].

Biomasa microbiana:

La biomasa microbiana es el componente más activo del suelo, forma parte del "pool" de la materia orgánica y cumple una función muy importante en el humus, ya que interviene en los procesos de mineralización de nutrientes, una vez muertos ponen a disposición de otros microorganismos y de las plantas los nutrientes contenidos en los restos microbianos y, por otro lado, también participan en la inmovilización. Así, los ciclos de algunos nutrientes mayoritarios, como el carbono, demuestran que la biomasa microbiana es clave en la dinámica de los nutrientes esenciales en el sistema edáfico; por ello, algunos autores afirman que la biomasa microbiana y su actividad en el suelo puede ser empleada como índice de comparación entre sistemas naturales o como indicador de las variaciones sufridas en el equilibrio de un suelo debido a la presencia de agentes nocivos o su manejo productivo. Es decir, que los parámetros microbiológicos, y por lo tanto bioquímicos, sirven para indicar posibles cambios netos en el equilibrio del suelo que no podrían detectarse con métodos tradicionales [6].

Algunos autores recomiendan indicadores sencillos de medir y de interpretar. Los más comunes que se utilizan son, entre otros, la biomasa microbiana, la respiración del suelo y las relaciones con la materia orgánica y el estado fisiológico del suelo, donde se ve involucrada la energía en los procesos orgánicos.

En cuanto a la biomasa microbiana, este indicador expresa la cantidad de microflora presente en el suelo a través de la extracción del carbono microbiano. El mismo se ve afectado por la agroclimatología que sufren las muestras *in situ*, es

decir la humedad, el calor, la biodiversidad de residuos orgánicos al ecosistema y por sustancias agresivas a la actividad microbiana [6].

3.4 MATERIA ORGÁNICA

La MO es uno de componentes del suelo más complejos que existen en la naturaleza, complejidad que se refleja en su composición química. Por ello, se dice que la materia orgánica del suelo (MOS), contiene probablemente la mayor parte, sino todos, los compuestos orgánicos que ocurren naturalmente, porque se origina de los productos metabólicos y los tejidos de plantas, animales y microorganismos. La MO tiene un profundo efecto sobre la disponibilidad de nutrientes para el crecimiento de la planta, además sirve como fuente de N, P y S a través de su mineralización [12].

3.4.1 LAS SUSTANCIAS HÚMICAS

Las sustancias húmicas constituyen una parte principal y estable de la MOS, son agregados moleculares heterogéneos, actualmente se consideran como asociaciones supramoleculares de moléculas con masas molares relativamente bajas, que se estabilizan por interacciones hidrofóbicas y puentes de hidrogeno, llegando a formar micelas [13] [14]. La estructura molecular de las sustancias húmicas, se visualiza como bloques de compuestos aromáticos unidos básicamente por enlaces de hidrógeno, que contienen gran cantidad de grupos funcionales tales como: Carboxílicos, fenólicos, alcohólicos, enólicos, cetónicos e hidroxiquinonas [15]. Las sustancias Húmicas son divididas operacionalmente en ácidos húmicos, ácidos fúlvicos y huminas, de acuerdo con su solubilidad en diferentes condiciones de pH.

- **Ácidos fúlvicos.** Los ácidos fúlvicos representan la fracción de humus, extraíble por álcali que no es precipitable por ácidos y que tiene color amarillento –rojo, se distinguen por su contenido superior en grupos funcionales ácidos carboxílicos e hidroxifenólicos y, por lo tanto, por su mayor capacidad para actuar destructivamente sobre los minerales. Son muy ricos en polisacáridos, en osaninas y en aniones minerales como fosfatos. Su elevado contenido en cargas aniónicas les confiere una gran aptitud para formar complejos estables con cationes polivalentes (Fe^{3+} , Al^{3+} , Cu^{2+} , etc.) [16].
- **Ácidos húmicos.** Generalmente son polímeros de alto grado, constituidos por monómeros conformados por unidades estructurales. Estas unidades se componen de: 1) un núcleo, 2) una cadena puente, y 3) grupos orgánicos reactivos, que se presentan entrelazados formando coloides esferoidales; su carácter ácido, o sea su capacidad de intercambio catiónico, se basa principalmente en la presencia de radicales COOH y OH . Los ácidos húmicos se extraen con NaOH , KOH , NH_4OH , $\text{Na}_4\text{P}_2\text{O}_7$,

NaHCO₃, NaF, oxalato sódico, urea u otros, solos o en mezcla de ellos, posterior acidificación con ácidos HCl o H₂SO₄, precipitando en forma de gel oscuro. ^[16]

- **Huminas.** Corresponden al grupo de sustancias húmicas que no se extraen con soluciones alcalinas, considerados como ácidos húmicos que han perdido la capacidad de disolverse en álcali. Esto debido a la alteración de las propiedades químico-coloidales, provocado por desecación e interacción de los ácidos húmicos con la fracción inorgánica del suelo. En el suelo se encuentran en diferentes estados: “humina microbiana”, formada por metabolitos microbianos y compuestos alifáticos derivados de ellos, “humina heredada”, próxima a la materia orgánica fresca, constituyente de las membranas, “humina noformada”, resultado de procesos de inmovilización por los cationes y no es extraíble por reactivos alcalinos, y finalmente “humina estabilizada”, resultante de la evolución lenta de los ácidos húmicos que provoca la polimerización de los núcleos aromáticos y un descenso de su solubilidad ante los reactivos de extracción ^{[16][17]}

3.4.2 IMPORTANCIA DE LA MATERIA ORGÁNICA PARA EL SUELO

La materia orgánica tiene funciones muy importantes en el suelo y en general, en el desarrollo de una agricultura acorde con las necesidades de preservar el medio ambiente y a la vez, más productiva ^[18].

La MO desempeña un papel determinante en el manejo adecuado del suelo, puesto que influye en sus propiedades físicas, químicas y biológicas. Su gestión en la agricultura se ha propuesto como una posibilidad más para la reducción de gases atmosféricos con efecto invernadero. Ella almacena nutrientes importantes para el crecimiento de las plantas y su tasa de descomposición determina su disponibilidad ^[19].

La MO ayuda a mantener las propiedades físicas del suelo; ya que disminuye la densidad aparente del suelo (por tener una menor densidad que la materia mineral), contribuye a la estabilidad de los agregados, mejora la tasa de infiltración y la capacidad de retención de agua. Existen numerosos estudios sobre la mejora de estas características tras el aporte de materia orgánica ^[18].

Químicamente la MO tiene un papel importante en la mejora de la disponibilidad de micronutrientes (principalmente hierro, manganeso, zinc y cobre) para las plantas así como en la reducción de los efectos tóxicos de los cationes libres. Muchos metales que precipitarían en suelos en condiciones normales, se encuentran mantenidos en la solución del suelo en forma quelatada; además favorece la capacidad tamponadora del suelo ^[18].

Biológicamente la MO sirve de fuente de energía para los microorganismos del suelo. Favorece la presencia de lombrices que contribuyen a estructurar el suelo. Algunos materiales orgánicos presentan actividad supresora frente a hongos y se utilizan para combatir hongos patógenos; además proporciona actividad enzimática. Parece que existen enzimas activas adsorbidas al humus o a las partículas de arcilla no ligadas a las fracciones vivas. Unas de las más abundantes son las hidrolasas. En general las enzimas contribuyen a hidrolizar moléculas de cadena larga, haciendo disponibles para las plantas algunos elementos resultantes de la hidrólisis ^[18].

3.4.3 CICLO DEL CARBONO

El ciclo global del carbono se describe tomando en cuenta los intercambios entre la atmósfera y la biosfera continental, así como las modificaciones causadas por las actividades humanas ^[20].

Los mayores depósitos de carbono se encuentran en los sedimentos, océanos, combustibles fósiles (carbón, petróleo, gas natural) y en la materia orgánica del suelo. Las plantas al crecer también fijan y almacenan carbono. Si el sistema global está en un estado de equilibrio dinámico, la concentración de CO₂ en la atmósfera permanece constante. El Carbono, principalmente en forma de CO₂, se intercambia mediante procesos naturales entre la atmósfera, la vegetación terrestre, y la hidrosfera. Este ciclo se lleva a cabo por la fotosíntesis en plantas, respiración en organismos, y por la disolución de CO₂ en el agua. Estos procesos dependen de factores climáticos como temperatura y precipitación, por lo que entre otras cosas, los cambios estacionales influyen en las concentraciones de CO₂. Los efectos de la fertilización debidos al dióxido de carbono y al nitrógeno influyen también en la fotosíntesis. En condiciones naturales, es decir sin intervenciones antropogénicas como la quema de combustibles fósiles, el carbono se movería en un ciclo natural que estaría en equilibrio ^[20].

3.4.4 RELACIÓN SUELO, CICLO DEL CARBONO Y CALENTAMIENTO GLOBAL

El suelo es un recurso viviente, dinámico y no renovable, cuya condición y funcionamiento es vital para la producción de alimentos, y para el mantenimiento de la calidad ambiental local, regional y global. Los procesos de descomposición y respiración que suceden en él tienen un papel importante para el mantenimiento del balance entre la producción y el consumo del CO₂ de la biósfera, tanto al reciclar el C atmosférico que está en forma de CO₂ como en la formación de la materia orgánica, la cual es reservoria no solo del C atmosférico sino de otros elementos ^[7]. Las etapas esenciales de los ciclos globales del agua, C, N, P y S suceden en el suelo, la velocidad del ciclaje y la disponibilidad de estos elementos están siendo alteradas continuamente por las diferentes formas de vida y por la constante búsqueda de fuentes de alimento y energía ^[7] ^[21]. Así, el suelo no solo

es la base para la agricultura y para los diferentes ecosistemas, sino que además de él depende toda la vida del planeta. Las prácticas de manejo convencionales como el arado, los patrones de cultivo y el uso de plaguicidas y fertilizantes han tenido influencia sobre la calidad del agua y de la atmósfera, ya que han generado cambios en la capacidad del suelo para producir y consumir gases como CO₂, óxido nitroso y metano. Además, el manejo convencional ha promovido la pérdida de la materia orgánica, reduciendo la fertilidad, la capacidad de campo y la estabilidad estructural, esto ha incrementado la erosión y el CO₂ atmosférico; por consiguiente, las prácticas agrícolas convencionales han contribuido al calentamiento global. Los niveles elevados de gases asociados al efecto invernadero y las alteraciones en los ciclos hidrológicos han producido cambios en el clima global y la reducción del ozono. Para afrontar esta amenaza se requiere comprender cómo el manejo del suelo está afectando sus procesos y por otra, plantear alternativas de uso que mantengan tanto la calidad ambiental como la eficiencia, es decir, alternativas sostenibles ^[7].

El protocolo de Kioto reconoce que el mal uso de los suelos contribuye a las emisiones netas de de carbono hacia la atmosfera, incrementando de esta manera el efecto del calentamiento global y a la degradación de este recurso. El sobrepastoreo de las tierras de pastoreo es una de las principales causas de la degradación, especialmente en zonas subhúmedas, semiáridas o áridas donde predominan las pasturas. El manejo con fuego es otro método utilizado para controlar las especies leñosas pues la quema de bosques nativos en su mayoría de veces se hace para aumentar las tierras destinadas a la agricultura o de pastoreo, lo que involucra pérdidas de carbono vegetal hacia la atmósfera ^[21].

Cuando los bosques nativos son destinados a tierras para pastoreo, la emisión de metano por el ganado hace que se incrementen los niveles de carbono en la atmosfera; también se generan problemas adicionales pues el sobrepastoreo es la principal causa de degradación pero los mecanismos que la causan son muy variables. En las áreas tropicales estas prácticas favorecen la compactación del suelo y las inundaciones; en las zonas áridas provoca principalmente una disminución en la cobertura del suelo y la consecuente erosión -hídrica o eólica- y desertificación ^[21].

3.4.5 MATERIA ORGÁNICA COMO INDICADOR DE LA CALIDAD DE SUELOS

La MOS es un indicador clave de la calidad del suelo, tanto en sus funciones agrícolas (por ejemplo: producción y economía) como en sus funciones ambientales -entre ellas captura de carbono y calidad del aire. La MO del suelo es el principal determinante de su actividad biológica; además la cantidad, la diversidad y la actividad de la fauna del suelo y de los microorganismos están directamente relacionadas con este parámetro. La materia orgánica y la actividad

biológica que esta genera tienen gran influencia sobre las propiedades químicas y físicas de los suelos ^[21].

Las variaciones en el contenido de MO debido a las actividades antropogénicas o naturales, son generalmente consideradas como uno de los indicadores primarios de la calidad del suelo, tanto en sus funciones agrícolas como ambientales; sin embargo, estas variaciones no son significativas a corto plazo, radicando en esto la principal desventaja de la MO como indicador de la calidad del recurso suelo ^[21].

3.5 EL FÓSFORO

Entre los tres elementos principales (N, P, K), el fósforo es requerido por las plantas generalmente en menores cantidades; sin embargo, su estudio ha adquirido la mayor importancia a causa de la baja disponibilidad de este elemento en la mayoría de los suelos agrícolas del mundo, debido no sólo a que su contenido total es bajo, sino a las múltiples reacciones que ocurren en el suelo, llevándolo a formas no asimilables ^[22].

3.5.1 FORMAS DE FÓSFORO EN EL SUELO

El fosfato en la solución del suelo representa la fracción más pequeña, pero a la vez la más importante para la planta, debido a que son estos aniones disueltos los que ella absorbe ^[3].

Los fosfatos del suelo se pueden dividir en dos grandes grupos: inorgánicos y orgánicos.

3.5.1.1 FÓSFORO INORGÁNICO

El fósforo inorgánico en el suelo se puede encontrar de diversas maneras, siendo de mayor importancia para la nutrición de las plantas el P disponible.

- **Fosfato insoluble de la roca madre (mineral primario)**, representa una gran parte del fosfato total del suelo. En esta forma es completamente indisponible para la planta. Constituye una reserva a largo plazo, la cual solo puede volverse disponible mediante procesos de meteorización a través de lentas y prolongadas transformaciones físicas, químicas y biológicas ^[3].
- **Fosfato precipitado o en forma de compuestos inorgánicos poco solubles**. Cuyas principales formas se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1. Principales formas de fosfato inorgánico [23]

Fosfatos	Denominación	Composición	Características
Calcio	Hidroxiapatita	$3\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ $\text{Ca}(\text{OH})_2$	mayor abundancia
	Oxiapatita	$3\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ CaO	
	Fluorapatita	$3\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ CaF ₂	mayor abundancia
	Carbonatoapatita	$3\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ CaCO ₃	
	fosfato tricálcico	$3\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$	
	fosfato bicálcico	CaHPO ₄	mayor solubilidad
	fosfato monocálcico	Ca(H ₂ PO ₄) ₂	mayor solubilidad
Hierro	Vivianita	Fe ₃ (PO ₄) ₂ 8H ₂ O	
	Estrengita	FePO ₄ 2H ₂ O	
Aluminio	Variscita	AlPO ₄ 2H ₂ O	

En suelos ácidos predominan los fosfatos precipitados de hierro y aluminio, mientras que en suelos calizos, son los fosfatos de calcio en forma de apatita. En suelos de pH elevado, la actividad del calcio controla la solubilidad del fósforo. Las relaciones encontradas indican que el H₂PO₄⁻ de los fosfatos de calcio es insoluble en suelos alcalinos, pero soluble en medios ácidos [3].

Los fosfatos de calcio comprenden una variedad de compuestos que varían en su solubilidad, desde relativamente solubles como monofosfatos y difosfatos de calcio presentes en cantidades pequeñas hasta las apatitas (hidroxi y fluoroapatitas) prácticamente insolubles. Los fosfatos de hierro y aluminio varían también ampliamente en solubilidad, dependiendo de la cantidad de fósforo presente. En los suelos ácidos es posible también la formación de sesquióxidos y sobre estos la formación de la estrengita y la variscita [24].

Entre los fosfatos inorgánicos se pueden distinguir formas químicamente bien definidas y cristalizadas, y otras no bien cristalizadas o amorfas, como los fosfatos adsorbidos y presentes en la solución del suelo [3].

Entre los fosfatos cristalinos encontramos los cálcicos, aluminicos y férricos; entre los primeros, son de importancia el fosfato monocálcico (Ca(H₂PO₄)₂), el fosfato dicálcico (CaHPO₄), y sus formas hidratadas (Ca(H₂PO₄)₂·H₂O y CaHPO₄·2H₂O), las apatitas hidroxidadas (Ca₅(PO₄)₃OH) y sus variedades fluorada y carbónica. Entre los segundos se destacan: el fósforo aluminico (variscita, AlPO₄·2H₂O) y los fosfatos férricos o ferrosos (livianita Fe₃(PO₄)₂·8H₂O, y estrengita Fe₄PO₄·2H₂O). Existen también fosfatos cristalinos complejos, derivados de la transformación de fertilizantes como taranakitas, fosfatos octacálcicos, gorceixita, cranealita y otros [3].

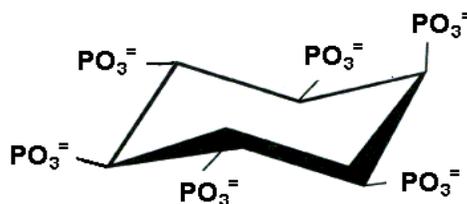
Por otro lado se deben considerar formas químicamente no bien definidas, no bien cristalizadas o amorfas, como los fosfatos adsorbidos al complejo coloidal y los ocluidos en los hidróxidos de Al, Fe y Mn a través de su proceso de cristalización y crecimiento. Estos fosfatos se denominan, generalmente, fosfatos ocluidos o inertes [3].

3.5.1.2 FÓSFORO ORGÁNICO

El P orgánico está compuesto por varias fracciones que varían desde las más fácilmente utilizables por la planta hasta las más resistentes a la mineralización. Puede representar desde un 15 al 80 % del contenido total de P en el suelo, siendo normal encontrar valores entre el 30 y 50 % en muchos suelos. Cuando se trata de suelos pobres en fósforo, la mineralización de la fracción orgánica, es importante en el reciclado ya que libera fósforo inorgánico a la solución, contribuyendo a mantener un nivel adecuado de fósforo disponible para las plantas. Algunos investigadores encontraron que la cantidad de P mineralizado en suelos de regiones templadas puede alcanzar valores entre 5 a 20 Kg/ha año, mientras que en los suelos tropicales puede variar desde 67 a 157 Kg de P/ha año. Esto demuestra la importancia que puede tener la fracción orgánica del fósforo como fuente de fósforo disponible para las plantas y lo variable de su rol, en función de las diferentes condiciones de suelo, de clima y prácticas de cultivo. El nivel de fósforo orgánico en los suelos, puede generalmente variar entre 25 y 75%, en casos extremos, estos límites pueden extenderse hasta 3 y 85% del fósforo total [25] [26]. Estas variaciones en el contenido de fósforo orgánico dependen de diversos factores tales como la temperatura, precipitación pluvial, acidez del suelo, grado de desarrollo, material parental y drenaje entre otros [21]. De acuerdo con la estructura química en la materia orgánica, existen cinco tipos principales de compuestos fosfatados:

- **Fosfatos de inositol.** Son moléculas resultantes de la esterificación del inositol con grupos fosfato. Estos compuestos representan entre un 30 y 80% del fósforo orgánico del suelo; el más común es el hexafosfato de inositol cuya estructura se observa en la figura 1 [27].

Figura 1. Estructura del hexafosfato de inositol

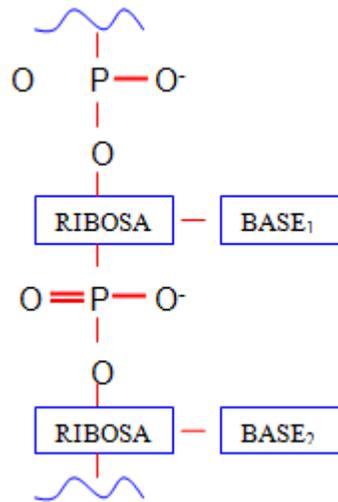


Los fosfatos de inositol son importantes componentes de granos de cereales en forma de fitatos de calcio y magnesio, denominados fitina. Los

hexafosfatos de inositol encontrados en el suelo pueden ser también de origen microbial, puesto que varios microorganismos pueden sintetizar esta molécula. En las plantas pueden encontrarse además ésteres de inositol con uno a cinco fosfatos, aunque el hexafosfato es el más abundante^[27].

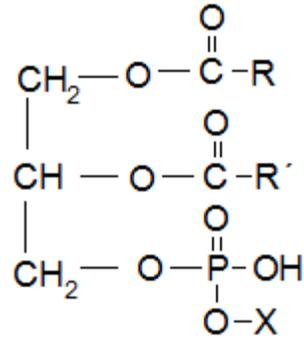
- **Ácidos nucleicos.** En los suelos los microorganismos sintetizan sus propios ácidos nucleicos a partir de pentosas, bases púricas, pirimidínicas y grupos fosfatos. Por acción de las fosfatasas, se libera fosfato al suelo. La participación de los ácidos nucleicos en el aporte de fósforo orgánico al suelo, puede llegar hasta un 65% del total del fósforo orgánico, aunque en general, el porcentaje de fósforo derivado de ácidos nucleicos no pasa de 3% como lo indican varios reportes ^[27]. En la figura 2 se muestra una representación de los ácidos nucleicos.

Figura 2. Representación de los ácidos nucleicos



- **Fosfolípidos.** Son moléculas anfipáticas porque en su estructura poseen regiones no polares debidas a cadenas hidrocarbonadas de ácidos grasos y regiones polares de las que hace parte el grupo fosfato. La cantidad total de fosfolípidos en el suelo es en general menor de 5µg/g. Los fosfolípidos representan entre el 0.5 y el 7% del fósforo orgánico con un valor medio del 1%. ^[27] Su fórmula general se relaciona en la figura 3.

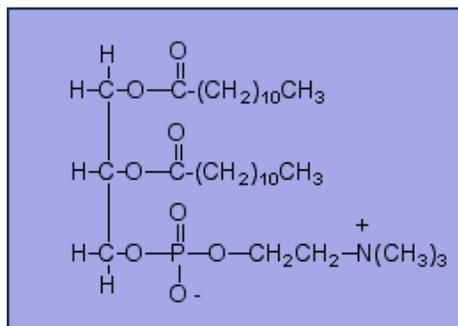
Figura 3. Fórmula general de los fosfolípidos



- **Fosfoproteínas.** Son heteroproteínas que al hidrolizarse producen, además de los aminoácidos, un grupo inorgánico "grupo prostético" como el fosfato. [27]
- **Fosfatos metabólicos.** Para que puedan ser utilizados, deben combinarse con el ácido fosfórico y producir el desdoblamiento de la glucosa que proporciona energía y la contracción muscular, la cual exige la combustión de los azúcares. El fósforo permite así a la glucosa transformarse en ácido láctico con desprendimiento de energía. Los compuestos fosfóricos favorecen la absorción de las grasas a nivel del intestino. Por otra parte aseguran el transporte de los ácidos grasos de que tiene necesidad el organismo, después de haberlos transformado en lecitinas [27].

La lecitina es una Fosfatidilcolina cuya fórmula se relaciona en la figura 4.

Figura 4. Estructura de la Lecitina



En el humus se encuentran fosfatos en proporciones entre 0,8 y 2,5% expresados como P₂O₅. Entre mayor sea el contenido de humus del suelo, más rico será este en fosfatos orgánicos. También en la masa microbiana del suelo hay una pequeña fracción de fósforo orgánico que solo se hace disponible para la planta con la muerte y desintegración de los microorganismos [31].

El fósforo es un elemento esencial para todas las formas de vida: Animal, vegetal y microbiano. Su contenido en los vegetales es de 0.5 – 1% de la materia seca en forma de fosfato (P_2O_5). Participa en muchas fases del metabolismo celular ya que hace parte de estructuras como ácidos nucleicos: DNA y RNA moléculas fundamentales en el flujo de la información genética; del sistema ATP-ADP esencial para la transformación de energía en procesos catabólicos y anabólicos; de fosfolípidos moléculas constituyentes de las membranas biológicas y de varias proteínas y enzimas esenciales en el funcionamiento celular [24].

3.5.2 MINERALIZACIÓN DEL FÓSFORO ORGÁNICO

Los microorganismos del suelo son componentes integrales del sistema suelo - planta y en particular importantes en la influencia de nutrientes como el fósforo en la planta, pueden afectar el suministro de P a las plantas superiores a través de la descomposición de compuestos orgánicos de P, a través de la inmovilización de los fosfatos disponibles y promoviendo la solubilización de las formas minerales insolubles o fijadas (agentes quelantes). La biomasa microbiana en sí contiene una gran cantidad de nutrientes que son potencialmente disponibles para las plantas [28].

El nivel de fosfato soluble en el suelo depende de dos procesos opuestos que se observan en la figura 5.

Figura 5. Proceso de mineralización e inmovilización del fósforo



La mineralización de fitatos es relativamente lenta, pero se trata de una importante fuente de PO_4^{3-} para las plantas, ya que la actividad de fitasas es común entre el suelo, microorganismos y hongos micorrizógenos. Así, compuestos como fosfoazúcares, ácidos nucleicos y fosfolípidos forman sólo una pequeña parte del contenido de fósforo orgánico que son mineralizados rápidamente. La lábil parte orgánica de P se define como "la piscina orgánica que experimenta una rápida transformación y contribución del P disponible para las plantas a través de la mineralización [28].

El contenido de P de los residuos de la descomposición de la materia orgánica desempeña un papel clave en la regulación de la cantidad de fósforo soluble. La inmovilización neta se produce cuando la relación Carbono/Fósforo orgánico (C/P_{org}) es de 300 o más, mientras la mineralización neta cuando la relación es 200 o menos.

La mineralización y la inmovilización de fósforo orgánico como un proceso biológico está muy influenciado por diversas propiedades físicas y químicas del suelo e inducidas por el hombre. A continuación se describen los factores que afectan el grado de mineralización del fósforo orgánico: [29] [30] [31] [32]

1. Temperatura: el grado de mineralización en general aumenta con la temperatura, es bastante rápido a temperaturas por encima de 300°C [28].

2. Humedad: algunos investigadores han sugerido que la mayor mineralización se produce bajo condiciones de humedad, mientras que otros indican que existe bajo condiciones más secas. Un importante aspecto es la alteración de las zonas secas, con condiciones de humedad [28].

3. pH: algunos estudios muestran que el grado de mineralización se incrementa con el aumento en el pH del suelo y disminuye cuando el pH es superior a 7. Podría estar asociado con cambios en la solubilidad del fósforo orgánico. El P orgánico es más estable por debajo de pH de 5 y superiores a 7,5 y responsable de la mineralización entre 5 -7 [28].

4. La actividad microbiana: se ha demostrado que las bacterias del suelo, actinomicetos, hongos y protozoos, pueden hidrolizar los compuestos orgánicos de P. Los procesos de mineralización se indican indirectamente por las correlaciones entre los grados de mineralización de P y C orgánico del suelo o la respiración [30].

5. Diferentes condiciones del suelo: (condiciones aeróbicas y anaeróbicas), en la que microorganismos varían en su actividad para hidrolizar los fosfatos orgánicos [28].

6. Fosfato inorgánico: algunos estudios han demostrado que el aumento del grado de mineralización después de la adición de P inorgánico permite al P orgánico ser más fácilmente desfosforilados por acción enzimática, debido a que el P desplazado se enlaza al Fe²⁺, Al³⁺ y Ca²⁺ [28].

7. Las plantas: son la fuente de materia orgánica en el suelo, pero su presencia debería aumentar el grado de mineralización de Po (p ej; por la actividad de la fosfatasa) [28].

8. Cultivo: algunos estudios han sugerido que el cultivo estimula la mineralización del fósforo orgánico [28].

9. Actividad enzimática: la mineralización de fósforo orgánico es afectada por la acción de las fosfatasas [28].

3.6 FERTILIZANTES

Por fertilizante se entiende cualquier material orgánico o inorgánico, natural o sintético que suministra a las plantas uno o más de los elementos químicos necesarios para su normal crecimiento ^[33].

Lo anterior supone que la condición indispensable para que un material se considere como fertilizante es doble: de una parte, debe contener uno o más de los nutrientes esenciales para el desarrollo vegetal y de otra, la sustancia en cuestión, por su naturaleza y propiedades específicas, debe estar en capacidad de ceder estos elementos a las planta, es decir, debe contenerlos en estado aprovechable ^[33].

3.6.1 TIPOS DE FERTILIZANTES

Hay dos tipos de fertilizantes, los que son de origen sintético y los de origen natural:

- **FERTILIZANTE QUÍMICO:** es un producto manufacturado que contienen cantidades substanciales de uno o más de los elementos esenciales primarios. El proceso de producción industrial envuelve usualmente reacciones químicas, pero también puede consistir simplemente en la refinación de las fuentes de fertilizantes naturales ^[33].
- **ABONO ORGÁNICO:** se denomina abono orgánico al material fertilizante cuyo portador nutricional es un compuesto de tal naturaleza. Entre los fertilizantes sintéticos, el único con portador nutricional es la urea. Otros abonos orgánicos son los de origen natural, tales como los residuos de cosecha, abonos verdes y estiércoles ^[33].

Por su composición pueden definirse en simples y complejos:

- **FERTILIZANTE SIMPLE:** se denomina así al fertilizante que contiene solamente a uno de los tres elementos esenciales primarios, tal es el caso de la urea, el superfosfato triple o el cloruro de potasio. ^[33]
- **FERTILIZANTE COMPUESTO:** es el abono que contiene más de uno de los tres elementos esenciales primarios. Los fosfatos de amonio o de potasio, por ejemplo, son fertilizantes compuestos ya que contienen fósforo, nitrógeno o potasio, respectivamente ^[33].

Los fertilizantes también se pueden clasificar por su granulometría.

- **FERTILIZANTE GRANULADO:** material fertilizante en el cual sus partículas están constituidas por gránulos de diámetro muy variable que oscila

generalmente entre 1 y 4 mm. En general, el termino granular no implica un proceso específico para obtener la granulación, ya que ésta puede lograrse mediante la agitación de partículas pequeñas, fraccionamiento o tamizado de fragmentos grandes y control del tamaño del cristal en los procesos de cristalización [33].

- FERTILIZANTE CRISTALINO: es el abono cuyas partículas están constituidas por cristales de diferente tamaño y forma. El sulfato de amonio, nitrato de potasio y cloruro de potasio constituyen ejemplos de fertilizantes cristalinos [33].
- FERTILIZANTE “PRILLED”: fertilizante cuya granulación de forma esférica se obtiene mediante la solidificación de gotas durante su caída en aire u otro medio fluido, tal es el caso de algunos tipos de urea. Las partículas resultantes son pequeñas y su diámetro oscila entre 1 y 2 mm [33].

3.6.2 FERTILIZACIÓN

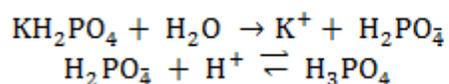
La fertilización con fósforo ha generado notables incrementos en los rendimientos de los cultivos. Es por ello que su utilización hoy ya no es discutida y son habitualmente incorporados en los planteos de producción [34].

La tendencia siempre creciente de los rendimientos lleva a la necesidad de incrementar la dosis de fertilizante a agregar, con el objetivo de reponer los nutrientes que extraen los cultivos y aprovechar el potencial de rendimiento generado a partir de la utilización de mejores variedades y prácticas de manejo [34].

El objetivo que se busca con la fertilización, es cubrir la cantidad de fósforo necesaria para corregir el déficit nutricional o diferencia entre los requerimientos del cultivo y el suministro de P disponible por parte del suelo [34].

Se ha comprobado que la reacción del fertilizante modifica el pH del suelo adyacente a la banda de aplicación durante cierto tiempo. Así, los efectos agronómicos derivados del pH de la reacción del abono fosfórico en el suelo, pueden ser importantes, pero su efecto positivo, negativo o inocuo dependerá de las condiciones del suelo, de la especie cultivada, de las condiciones ambientales, la disponibilidad de agua en el suelo, tamaño y tipo de partícula y tecnología de aplicación del abono [33]. Las ecuaciones 1 y 2 muestran las reacciones que justifican porque los fertilizantes fosfatados varían el pH.

Reacción del KH_2PO_4 en el suelo: (reacción ácida)



Ecuación 1
Ecuación 2

3.7 IMPORTANCIA DE LAS ENZIMAS DEL SUELO.

La importancia fundamental de la actividad de las enzimas del suelo radica en que el funcionamiento de este ecosistema no se puede entender correctamente sin la participación de los procesos enzimáticos, ya que las enzimas determinan la pauta de gran parte de las transformaciones químicas que se producen en dicho suelo [35].

Las enzimas son proteínas globulares cuyo papel es catalizar las reacciones químicas en los sistemas vivos, actúan sobre sustratos específicos transformándolos en productos necesarios para los ciclos biológicos. Los organismos y las plantas liberan enzimas al suelo por secreción y por lisis celular después de su muerte; un bajo porcentaje de estas proteínas quedan inmovilizadas y estabilizadas en interacción con los diferentes componentes de la fase sólida del suelo, como las arcillas, moléculas orgánicas y complejos organominerales [7]. Dependiendo del material, la interacción se da por mecanismos que incluyen: microencapsulación, enlaces transversales, formación de copolímeros, adsorción, entrapamiento, intercambio iónico y enlaces covalentes [36]. Solo un bajo porcentaje de las enzimas que abandonan las células se encuentran estabilizadas, ya que se liberan a un ambiente inhóspito donde pueden ser sometidas a desnaturalización no biológica, adsorción, inactivación o degradación por proteasas. Al igual que en los otros sistemas vivos, la velocidad de la reacción catalizada por una enzima es dependiente del pH, fuerza iónica, temperatura y de la presencia o ausencia de inhibidores, además de la concentración del sustrato y de su propia concentración. Las enzimas proceden de células proliferantes, latentes, o restos de ellas. La mayor producción de enzimas extracelulares se le atribuye a microorganismos por su gran biomasa, su alta actividad metabólica y su corto ciclo de vida, en contraste con otros organismos que también las pueden liberar como las plantas y los animales [7]. Las enzimas del suelo más estudiadas son las oxidoreductasas (deshidrogenasas, catalasas y peroxidasas) y las hidrolasas (sobre todo fosfatasas, proteasas y ureasa).

Las enzimas del suelo ofrecen información sobre su capacidad potencial para llevar a cabo reacciones específicas, las cuales son importantes dentro del ciclo de nutrientes importantes tales como el C, N, P y S, pudiendo aportar información clave sobre aspectos relacionados con la calidad y salud de los suelos. Ciertas enzimas muestran una gran sensibilidad frente a procesos no deseables tales como la contaminación de suelos, su degradación e incluso su desertificación [7] [35].

3.7.1 MEDIDAS DE ACTIVIDADES ENZIMÁTICAS

Los ensayos de actividad enzimática proporcionan información sobre la microbiota del suelo. El ciclo de nutrientes implica reacciones bioquímicas, químicas y fisicoquímicas. En casi todos los procesos que ocurren en el suelo intervienen los microorganismos y se encuentran catalizados por enzimas, ya que estas son las

mediadoras biológicas del catabolismo biológico y de los componentes orgánicos y mineral del suelo lo que las hace adecuadas como indicadores de la actividad biológica, ya que indican la velocidad de reacción de importantes procesos que ocurren en el suelo. Las enzimas presentes en el suelo provienen de animales, plantas y microorganismos. Generalmente se considera a los microorganismos como la principal fuente de enzimas en el suelo, por lo que la medida de varias enzimas se puede considerar como un indicador de la actividad de las poblaciones microbianas del suelo. [28]

Las reacciones producidas por acción de microorganismos del suelo, catalizadas por enzimas, desempeñan un papel básico en los ciclos de carbono, nitrógeno, fósforo y azufre del suelo y contribuyen a la detoxificación del suelo degradando contaminantes orgánicos o inmovilizando metales pesados, participando en la formación de la estructura del suelo e influyendo negativa o positivamente en el crecimiento de las plantas.

Las enzimas del suelo presentan las siguientes características:

- a) Con frecuencia se encuentran relacionadas con el contenido de materia orgánica del suelo, con sus propiedades físicas y con la actividad microbiana o la biomasa.
- b) Son mucho más sensibles que otros parámetros a las alteraciones del medio edáfico, lo que proporciona una posibilidad de indicación temprana de cambios en la calidad del suelo.
- c) Implican a procesos simples.

La actividad enzimática puede emplearse como medida de la actividad microbiana, de la productividad del suelo y del efecto inhibitorio de contaminantes. A continuación se citan las principales razones para medir las actividades de las enzimas:

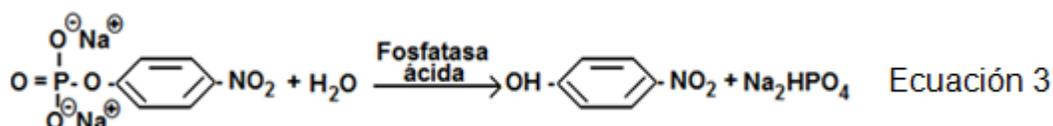
- a) Informan del potencial bioquímico del suelo requerido para manipular su ecosistema.
- b) Son indicadores de calidad del suelo; los cambios en las actividades enzimáticas son clave para proporcionar información sobre el progreso de las operaciones de recuperación de suelos o sobre la sostenibilidad de determinados sistemas de manejo agrícolas. [13]

3.7.2 FOSFATASA ÁCIDA

De las numerosas enzimas que han sido encontradas en el suelo, el grupo de las fosfatasas ha recibido una atención considerable. Estas enzimas hidrolizan los compuestos orgánicos de P, pirofosfatos, metafosfatos y polifosfatos presentes en

el suelo [37]. El interés sobre las mismas se debe a la importancia del P en la nutrición de las plantas.

Dentro del grupo de las fosfatasa se encuentra la monoesterfosfato hidrolasa que cataliza la hidrólisis de glicerofosfatos y se diferencian por el pH óptimo de actuación en fosfatasa ácida (E.C. 3.1.3.2) y/o alcalina (E.C. 3.1.3.1), las ácidas son producidas por microorganismos y plantas superiores, mientras que las alcalinas son producidas principalmente por microorganismos [37]. Las fosfatasa pueden hidrolizar compuestos que contienen los siguientes enlaces P---F, P---O—C, P---O—P, P—S y P—N, pero no el enlace P---C [38]; estas enzimas al hidrolizar fosfomonoésteres liberan fosfato inorgánico (ecuación 3). La literatura reporta que el p-NF producido durante la catálisis por la fosfatasa ácida se comporta como inhibidor de tipo no competitivo, mientras que el fosfato inorgánico muestra una inhibición de tipo competitiva [39].



Estas enzimas constituyen un índice de la potencialidad de un suelo para mineralizar el Po y también estimar la actividad biológica de los suelos. La actividad de la fosfatasa ácida ha sido frecuentemente usada como indicador de cambios en cantidad y calidad de la MOS; sin embargo en la en la mineralización bioquímica de la MO por la fosfatasa ácida influyen las propiedades del suelo, los sistemas de producción y factores ambientales como temperatura y grado de humedad [40].

3.6.3. FACTORES QUE INFLUYEN EN LA ACTIVIDAD DE LA FOSFATASA DEL SUELO

Varios autores han estudiado los factores ecológicos básicos que influyen en la actividad de las enzimas del suelo [12] [37] [41] [42] [43]. Entre estos factores se encuentran:

- La humedad, temperatura, aireación, pH, contenido de coloides orgánicos e inorgánicos del suelo.
- La vegetación, la calidad y cantidad de materia orgánica.
- Los encalantes utilizados comúnmente para corregir la acidez y los fertilizantes utilizados para suplir el déficit nutricional del suelo.

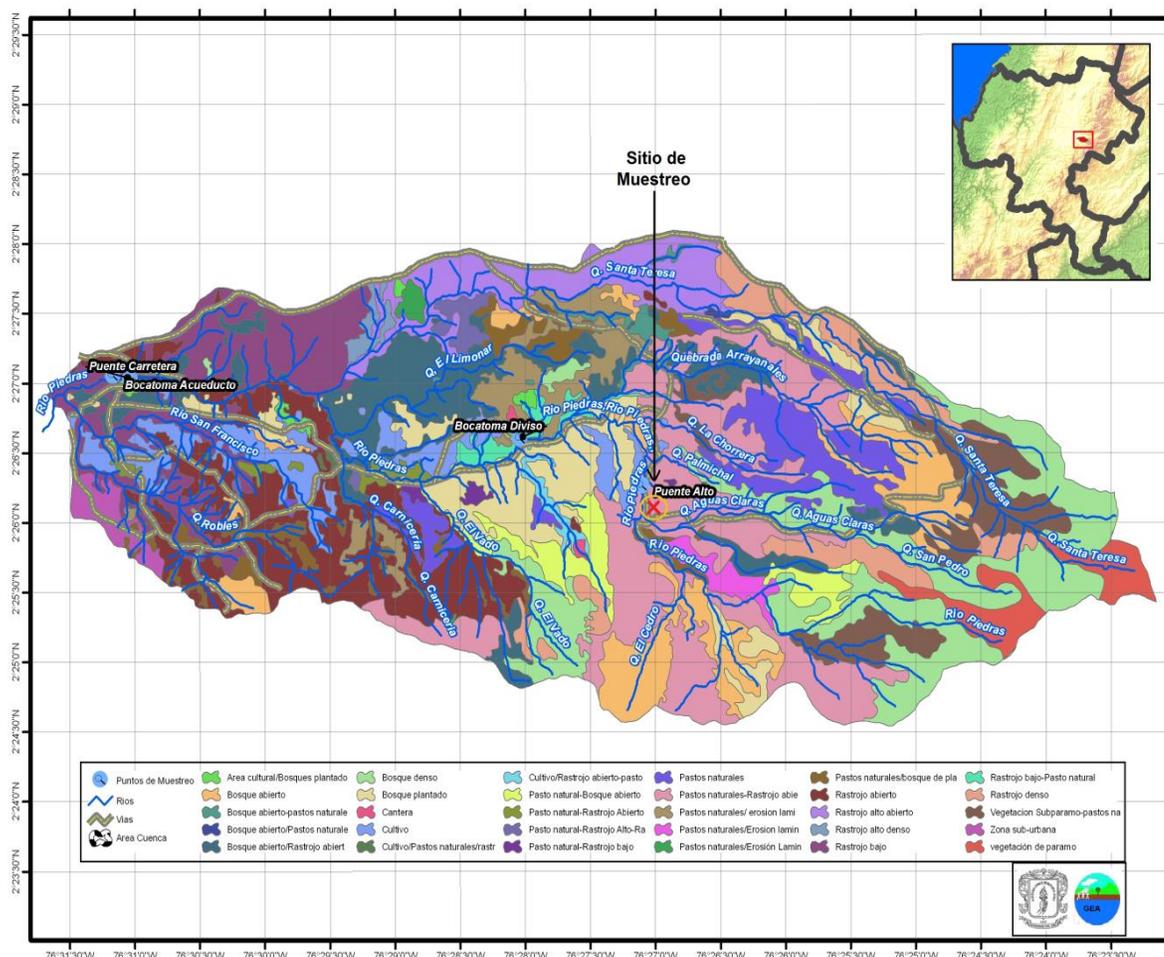
4. METODOLOGÍA

4.1 UBICACIÓN GEOGRÁFICA

El suelo estudiado se encuentra localizado en la finca Sardina, correspondiente al Grupo Sardina que agrupa ocho familias de la microcuenca Arrayanales del Río Piedras en la vereda Quintana, Corregimiento Quintana, Municipio de Popayán, Localización geográfica: 2°26'36,9" latitud norte 76°27'06,63" al oeste de Greenwich, altura. 2362 m.s.n.m, temperatura promedio 16°C.

La cuenca se caracteriza por presentar actividades agropecuarias asociadas a cultivos de papa, ganadería y criaderos de alevinos (piscifactorías). Esta cuenca se caracteriza por ser fuente abastecedora del Acueducto de Popayán.

Figura 6. Ubicación geográfica del sitio de muestreo



4.2 TOMA DE MUESTRA

La toma de la muestra de suelo se realizó de acuerdo a la metodología estandarizada en el laboratorio de Agroquímica de la Universidad del Cauca. Para obtener un valor analítico representativo del volumen del suelo se dividió el terreno en unidades de muestreo y se seleccionó una de ellas. Para tomar las respectivas muestras, se delimitó el área y se cruzó en zig – zag, haciendo sondeos en la capa arable que comprendió alrededor de 0-10 cm de profundidad. Se tomaron 15 submuestras mezclándolas homogéneamente, formando con éstas una muestra compuesta de 1 Kg. La muestra compuesta se llevó al laboratorio de agroquímica de la Universidad del Cauca, e inmediatamente se determinó la humedad de campo y posteriormente se secó al aire por 24 horas, se molió y se pasó por tamiz de 2 mm. Otra porción de 8 kg de muestra que fue tomada en las mismas condiciones para el estudio de la actividad de la fosfatasa ácida, se dispuso en sendas bolsas de polietileno color negro, almacenándola a 4°C hasta el análisis respectivo.

4.3 CARACTERIZACIÓN FÍSICA Y QUÍMICA DEL SUELO

Con el objeto de identificar el tipo de suelo a estudiar, se realizaron análisis físicos y químicos, de acuerdo a la metodología estandarizada por Bravo *et al* en el laboratorio de Agroquímica de la Universidad del Cauca; reportada en la última corrección de 2003 como “Manual de prácticas de Química Agrícola: análisis de suelos” [37].

4.3.1 ANÁLISIS FÍSICOS

Humedad: Se refiere al contenido de agua con relación al peso o volumen de la masa de suelo. Se expresa en forma gravimétrica cuando tiene relación con la masa del suelo y volumétrica cuando se relaciona con el volumen del suelo. Se determinó en este caso por el método gravimétrico que es la relación entre la masa de agua y la masa de los sólidos del suelo. Consiste en pesar la muestra antes y después del calentamiento a 105°C con el objeto de eliminar el agua superficial en una estufa con circulación de aire forzado.

Textura: Se refiere específicamente a las proporciones de arena, limos y arcillas (partículas menores a 2 mm de diámetro), que se encuentran en una masa de suelo. la textura del suelo es una propiedad física que se emplea como un criterio importante para evaluar otras propiedades como son la capacidad de intercambio catiónico, índices de plasticidad, empleada para la clasificación del suelo entre otras.

Se determinó la textura por el método de la pipeta el cual comprende dos pasos generales: uno correspondiente al tamizado de la fracción gruesa (utilizando una variedad de tamices), el otro corresponde a un proceso de sedimentación de la

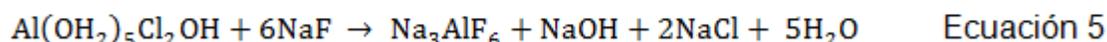
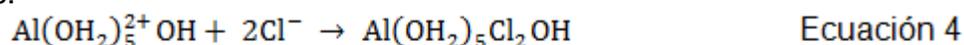
fracción fina en agua (utilizando la pipeta para la evaluación de las diferentes partículas finas).^[35]

Densidad Aparente por el método del cilindro: Se realizó adicionando una cantidad de suelo fresco en un cilindro metálico previamente secado en la estufa y con dimensiones conocidas, por la relación entre la masa del suelo y el volumen del cilindro se determina la densidad aparente.

4.3.2 ANÁLISIS QUÍMICOS

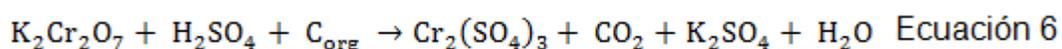
pH: Se determinó mediante el método potenciométrico, para ello se tomaron 20g de suelo y se le adiciono la cantidad de agua necesaria para formar una pasta saturada; el pH se determinó utilizando un pH – metro METROHM E-744® con electrodo combinado de vidrio.

Acidez intercambiable: Se determinó mediante el método de desplazamiento, que consiste en desplazar los iones H⁺ y Al³⁺ del suelo con una solución neutra de KCl. Los iones desplazados son titulables con soda en presencia de fenoltaleína. Una vez titulados estos iones quedan en forma de Al(OH₂)₅²⁺ y se valorará el Al³⁺ presente en forma hidratada de acuerdo a las siguientes reacciones:



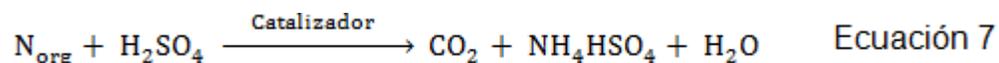
El NaOH producido se tituló con HCl 0,2 N y como la cantidad de NaOH depende de la cantidad de AlCl₃, el número de miliequivalentes de ácido clorhídrico empleados para neutralizar el NaOH es igual al número de miliequivalentes de Al³⁺. La acidez intercambiable menos acidez de aluminio es igual a la acidez del H⁺.

Materia orgánica: Se determinó por el método colorimétrico a 585 nm. Para ello se tomaron 0,1 g de suelo seco y tamizado por malla 10, se adicionó 5 mL de dicromato de potasio 1 N y 10 mL de ácido sulfúrico concentrado (98 – 99 % de Pureza). Se agitó durante 1 min y posteriormente se dejó reposar por 30 min. Seguidamente se adicionaron 135 mL de agua destilada medidos en una probeta, se agitó vigorosamente y se dejó decantar durante 12 horas. Posteriormente se tomó del sobrenadante una alícuota para medir la absorbancia a una longitud de onda de 585 nm. El contenido de carbono orgánico (% Corg) en la muestra se obtiene al interpolar el valor de la absorbancia en la curva de calibración con seis niveles, la cual se preparó siguiendo el mismo procedimiento descrito para la muestra usando como patrón sacarosa.



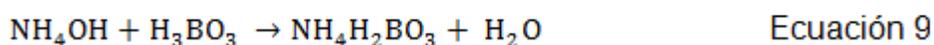
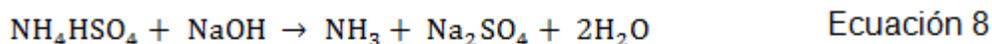
Determinación de nitrógeno por el método de Kjeldahl: El método empleado es el utilizado universalmente en la determinación cuantitativa de N procedente de diversos materiales; consta de tres etapas:

1) Oxidación de la muestra: Las muestras de suelo son tratadas separadamente con H_2SO_4 y una mezcla catalizadora de $CuSO_4$, Selenio y K_2SO_4 para oxidar la materia orgánica y convertir el nitrógeno en sulfato ácido de amonio según la siguiente reacción:



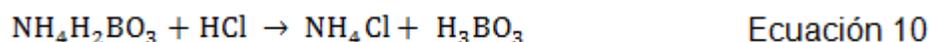
El equipo utilizado en la digestión fue el BÜCHI B-426®

2) Descomposición del sulfato ácido de amonio: El sulfato de amonio se descompone por medio de un exceso de álcali para liberar el amoníaco, el cual se recoge por destilación sobre ácido bórico. Las reacciones son las siguientes:

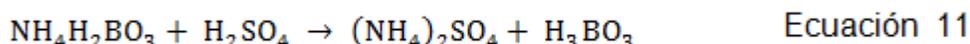


El equipo de destilación empleado fue BÜCHI K-314®

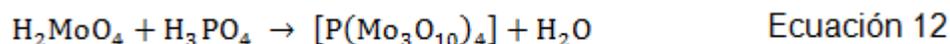
3) Titulación del borato de amonio: El borato de amonio formado en el paso anterior se valora con HCl o H_2SO_4 0.1N utilizando como indicadores una mezcla de rojo de metilo y verde de bromocresol. La reacción es la siguiente:



Ó



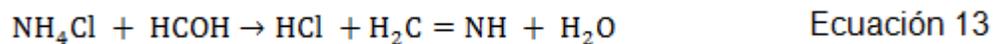
Determinación de fósforo disponible: El método utilizado para esta determinación en suelos ácidos fue el Bray II, en el cual el ión fluoruro precipita el calcio soluble, extrayendo así las formas de P-Ca más solubles. Una vez extraído el fósforo, se procedió a su determinación por el método colorimétrico, el cual consistió en formar un complejo del fósforo con ácido molíbdico que absorbe a 660nm. El método cloro-molíbdico utiliza una solución de $HCl-(NH_4)_6Mo_7O_{24} \cdot 4H_2O$, que al reaccionar produce H_2MoO_4 . Posteriormente, este ácido molíbdico reacciona con el ácido fosfórico de acuerdo a la siguiente reacción:



Este heterocompuesto incoloro, que por reducción con ácido ascórbico forma un compuesto de color azul que absorbe a 660 nm.

El equipo utilizado en esta determinación fue el Espectrofotómetro visible SPECTRONIC GENESYS 20®.

Determinación de la Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC): Consiste en desplazar todos los cationes del suelo y reemplazarlos por iones NH_4^+ ; el suelo seco, tamizado y muy fino, se satura con NH_4^+ . Posteriormente, hay un desplazamiento de los iones NH_4^+ adsorbidos con NaCl , al 10% obteniéndose NH_4Cl en solución, que se trata con formaldehído neutro. El HCl obtenido se titula con NaOH 0,1 N. La siguiente reacción muestra lo ocurrido:

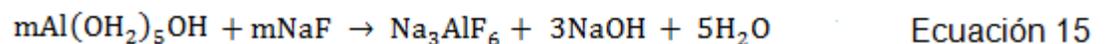
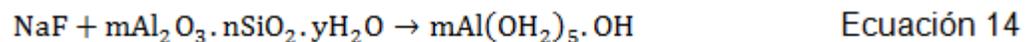


Determinación de las bases Intercambiables: Correspondientes al Calcio, Magnesio, Sodio y Potasio. Se determinan con el primer extracto del tratamiento con acetato de amonio (AcONH_4) de la determinación de CIC, la cuantificación se realizó por espectrofotometría de Absorción Atómica, en el equipo Perkin-Elmer 3100® de la Secretaria de Agricultura del Departamento del Cauca.

Determinación de Microelementos: Correspondientes al Hierro, Cobre, Manganeso y Cinc. Se determinaron por extracción con DTPA (Ácido-Dietilen-Triamino-Penta-Acético) y la cuantificación se realizó por espectrofotometría de Absorción Atómica, en el equipo Baria-Techtron Absorción atómica 120® de la Secretaria de Agricultura del Departamento del Cauca.

Evaluación de la presencia de alófanos: Consiste en evaluar el valor de pH del suelo en fluoruro de Sodio relación 1:50. Se agita la suspensión por un minuto. Se lee el pH en la tercera parte superior de la suspensión exactamente a los 2min de la adición del NaF . Un valor de pH mayor o igual a 9.4 indica la presencia de alófanos.

Básicamente lo que ocurre es que el flúor (fluoruro) del fluoruro de sodio reacciona con las arcillas del suelo, produciendo una liberación de grupos hidroxilos, aumentando el valor de pH, las reacciones que describen este proceso son las siguientes:



Fraccionamiento de la materia orgánica: Con el objeto de determinar el extracto húmico total y de valorar las sustancias húmicas, se separan los compuestos húmicos de la materia orgánica no humificada, empleando el método

granulométrico de tamizaje en húmedo con mallas comprendidas entre N°. 53 y 106 μm . Para fraccionar las sustancias húmicas se empleó el método de extracción con soluciones básicas.^[45]

- **Método Granulométrico:** El cual se fundamenta en que los agregados del suelo considerados normalmente estables en agua, se disocian por tratamiento mecánico moderado, en microagregados y complejos orgánico-arcillosos, que posteriormente serán separados por granulometría. Este método garantiza una mínima desnaturalización de las estructuras de las sustancias húmicas. Consistió en utilizar la diferencia de tamaño molecular de la materia orgánica humificada y la materia orgánica fresca (no humificada). La fracción menor de 53 μ corresponde a la materia orgánica humificada y la fracción mayor de 53 μ corresponde a la materia orgánica fresca. Para separar dichas fracciones, se utilizó un tamizador automático (Retsch As200®). El proceso se describe en la figura 7.

- **Método de Extracción y Valoración de Sustancias Húmicas:** Después de la separación de la materia orgánica humificada, se procedió al fraccionamiento de las sustancias húmicas, con el propósito de evaluar el contenido de fracción fúlvica, ácidos húmicos, huminas y así evaluar el grado de humificación de la materia orgánica de los suelos. El procedimiento se relaciona en la figuras 8, 9 y 10.

Figura 7. Diagrama de separación granulométrica de la MO

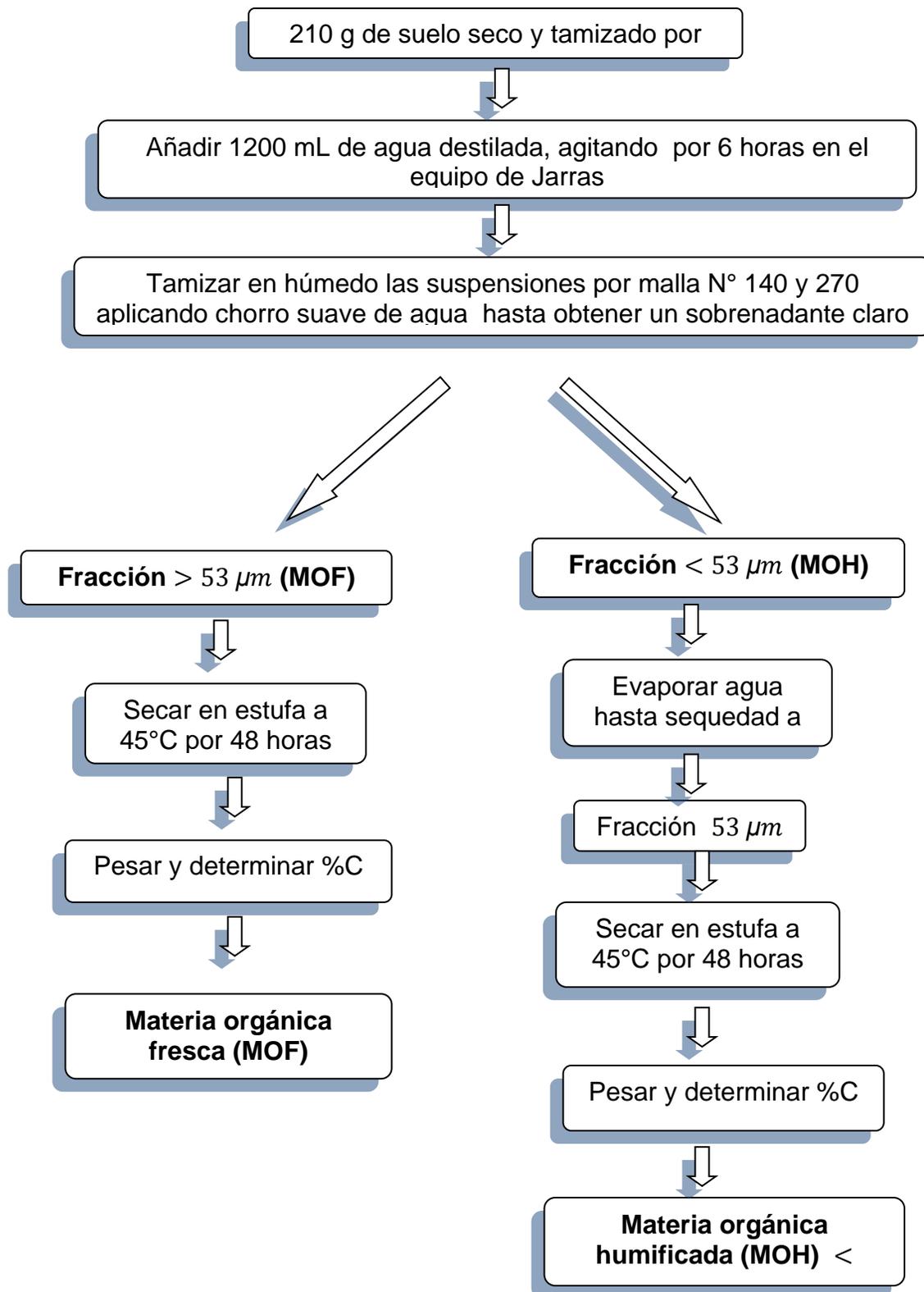
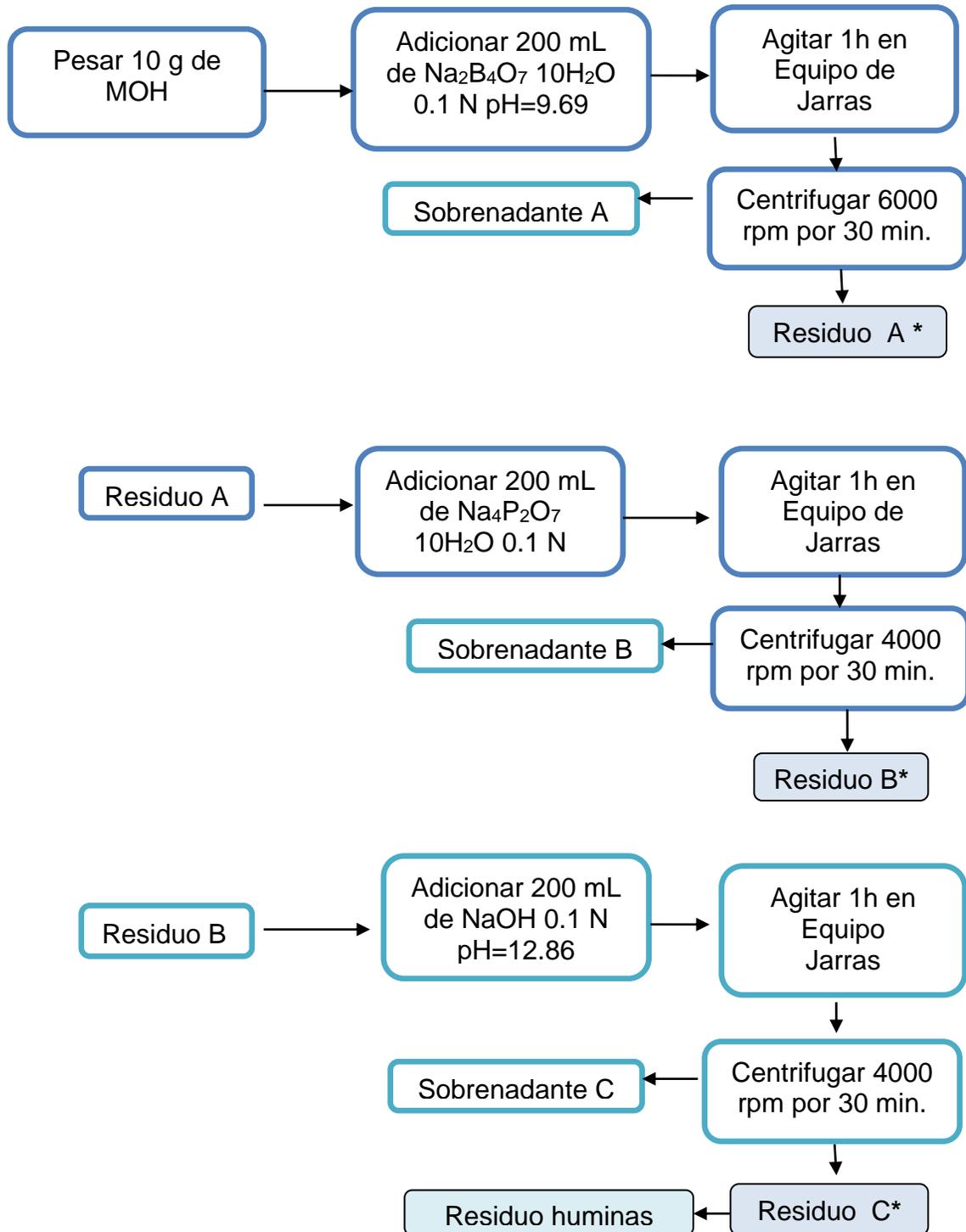


Figura 8. Extracción de las sustancias húmicas



*Continuar extracción hasta obtener una solución clara

Figura 9. Floculación de arcillas

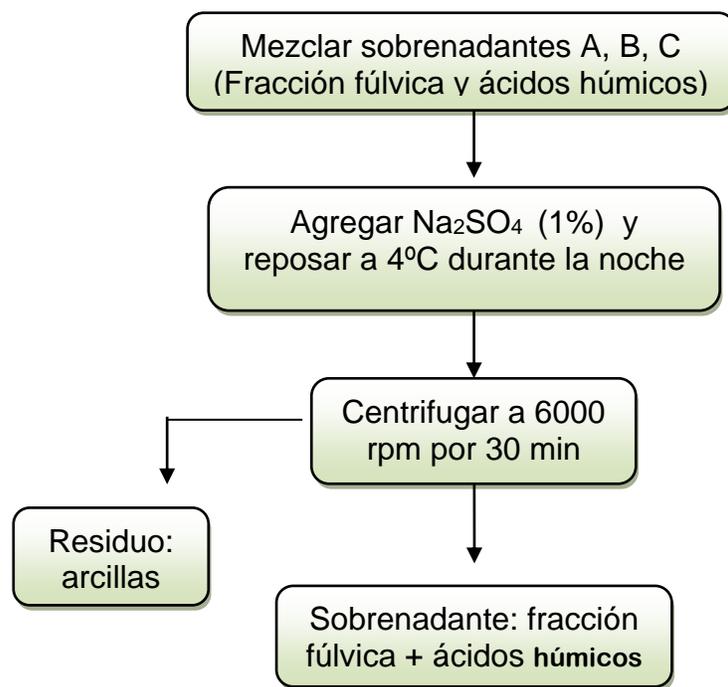
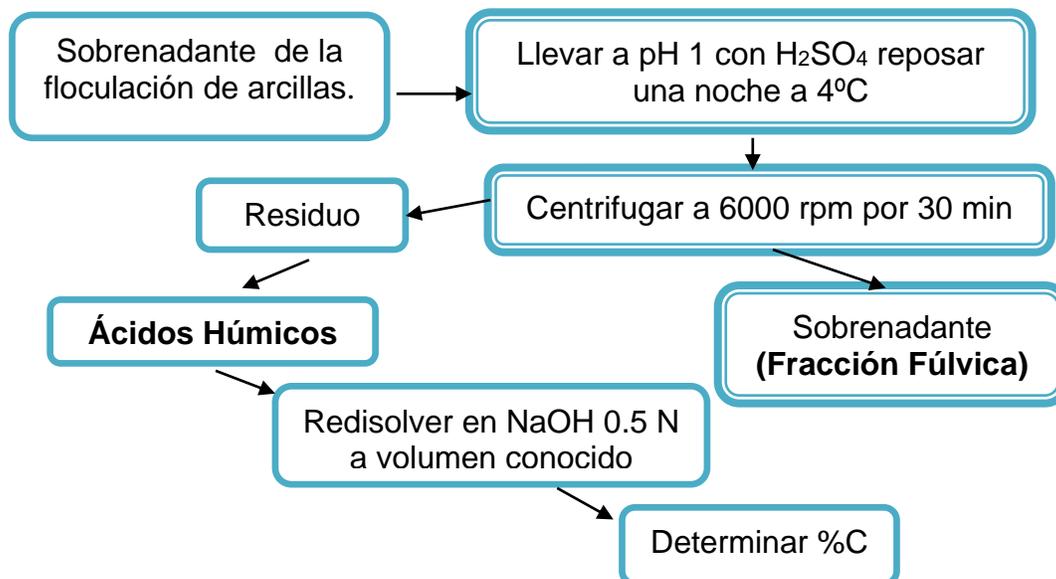


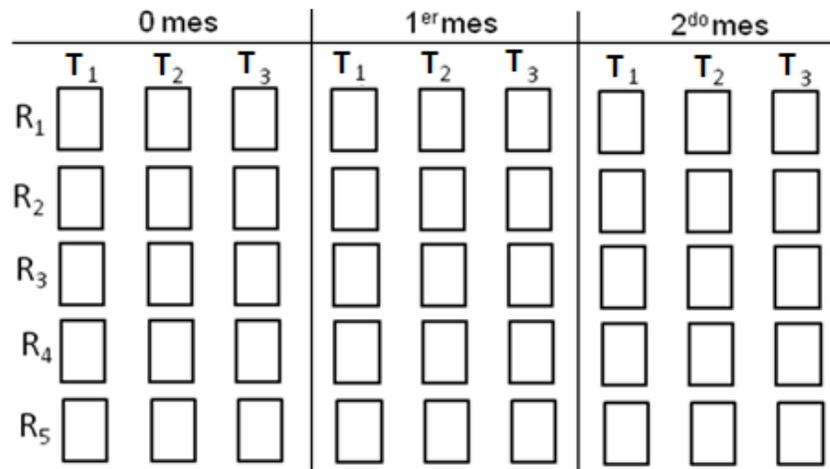
Figura 10. Separación de los ácidos húmicos y fracción fúlvica



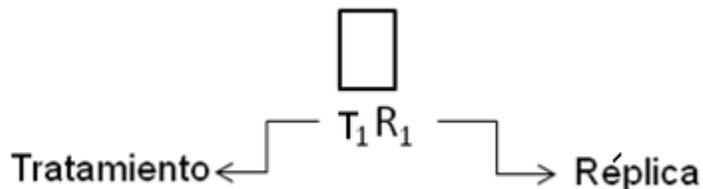
4.4 EVALUACIÓN DE LA FERTILIZACIÓN SOBRE LA ACTIVIDAD DE LA FOSFATASA ÁCIDA

Para evaluar el efecto de la fertilización se utilizó un diseño experimental factorial de bloques, donde el factor o variable independiente fue el fertilizante con dos niveles, proveniente de dos fuentes: Triple 15 y fosfato diácido de potasio, con una dosis cada uno, con tres períodos de incubación y cinco réplicas, incluyendo un testigo absoluto, para un total de 45 tratamientos. Las variables dependientes fueron la actividad de la fosfatasa ácida, el P disponible y el Po, el P total, el pH y la MO. Se utilizó el método en paralelo. En la Figura 11 se relaciona el diagrama correspondiente.

Figura 11. Diagrama de diseño experimental para la evaluación del efecto de la fertilización sobre la actividad de la fosfatasa ácida.



T₁: Suelo Testigo; T₂: Suelo fertilizado con Triple 15; T₃: Suelo fertilizado con Fosfato diácido de potasio; R₁: Réplica 1; R₂: Réplica 2; R₃: Réplica 3; R₄: Réplica 4; R₅: Réplica 5.

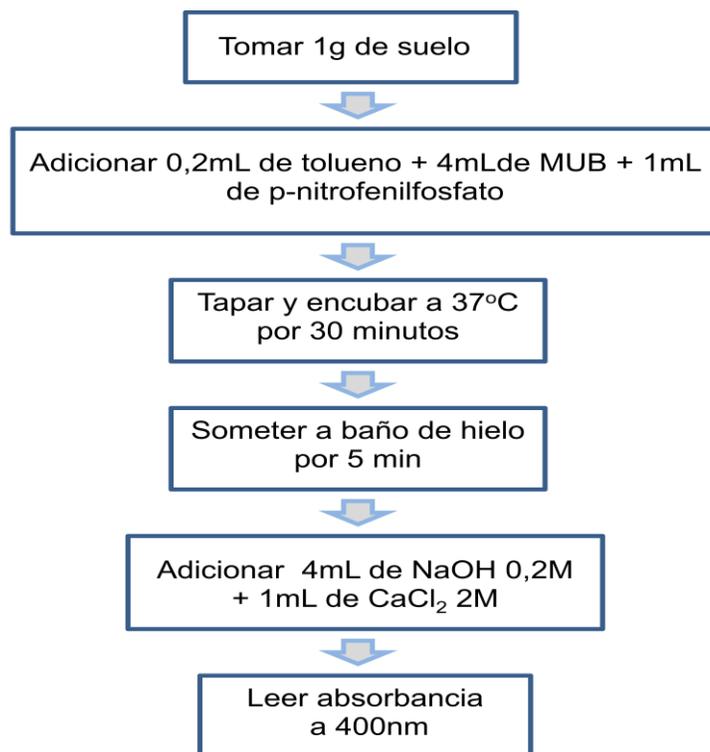


4.5 DETERMINACIÓN DE LA ACTIVIDAD ENZIMÁTICA DE LA FOSFATASA ÁCIDA

Para determinar la actividad de la fosfatasa ácida se utilizó el método colorimétrico implementado en el laboratorio de Agroquímica - basado en el método reportado por Tabatabai y Bremner (1994) [46] [47] [48].

El método implementado, utiliza como sustrato p-nitrofenilfosfato disódico 0.05M a pH 6.5, el cual por acción de la enzima se escinde en p-NF y ácido fosfórico en un tiempo de incubación de 30 minutos a 37°C, para detener la reacción (actividad enzimática de la fosfatasa ácida) se somete el sistema de trabajo a un baño de hielo durante 5 minutos. El p-NF absorbe a una longitud de onda de 400 nm. Se realizó una curva de calibración con p-NF, en diferentes concentraciones que se ajusten a la Ley de Beer. Durante la determinación de la actividad enzimática de la fosfatasa ácida se utilizó p-nitrofenilfosfato disódico y una cantidad de suelo dada en un recipiente aparte y por separado como blanco de sustrato y de enzima, respectivamente. El diagrama del proceso para la determinación de la AFA se observa en la figura 12.

Figura 12. Diagrama del proceso para la determinación de la fosfatasa ácida



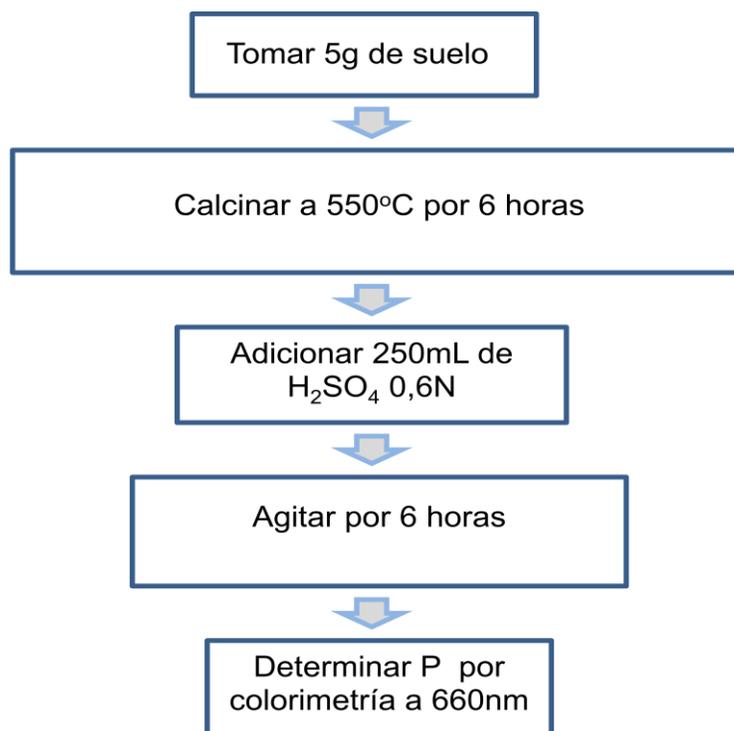
4.6 EVALUACIÓN DEL FÓSFORO DISPONIBLE, ORGÁNICO Y FÓSFORO TOTAL, pH Y MO

Se realizó un seguimiento mensual del contenido de fósforo en sus diferentes formas, del pH y de la MO con el fin de observar la correlación que existe con la fertilización y la AFA en el suelo bajo estudio.

El fósforo disponible: Se determinó por el mismo método que se describe en la caracterización química del suelo.

El fósforo orgánico: se determinó por calcinación del suelo a 550° C durante 6 horas, una vez calcinado se adicionó ácido sulfúrico 0.6N y se agitó por 6 horas. Se tomó una alícuota de 2 mL y se adicionó 18 mL de solución coloadora. Paralelo a esto se aplicó el mismo procedimiento a una muestra sin calcinar, se cuantificó por el método colorimétrico usando curva de calibración y por diferencia entre las dos extracciones se determinó el P orgánico. El diagrama del proceso se muestra en la figura 13 ^[49].

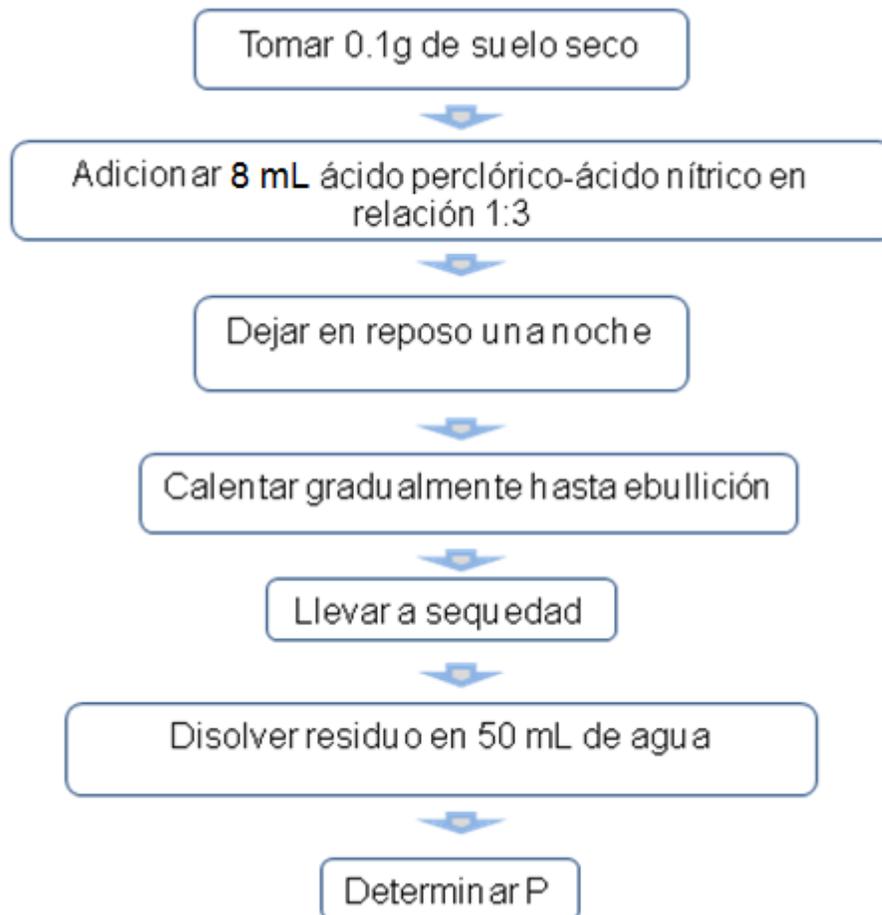
Figura 13. Proceso para la determinación de fósforo orgánico



Nota: igual procedimiento se aplica a una muestra sin calcinar, por diferencia entre las dos extracciones se determina el P orgánico.

El fósforo total: se determinó por digestión del suelo con una mezcla de ácido perclórico/ ácido nítrico en relación 1:3, se calentó suavemente hasta llevar a sequedad y posteriormente se llevó hasta 50 mL con agua destilada. Se tomó una alícuota de 2 mL, se adicionó 18 mL de solución coloadora y pasados 15 minutos se determinó por el método colorimétrico. El diagrama del proceso se muestra en la figura 14 ^[49].

Figura 14. Diagrama del proceso para la determinación de fósforo total



pH: Se determinó en pasta saturada, para ello se siguió el mismo método que se describe en la caracterización química del suelo

MO: Se determinó por el método colorimétrico, igual como se describe en la caracterización química del suelo

5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

5.1 ANÁLISIS FÍSICOS Y QUÍMICOS DE LOS SUELOS

En la tabla 2 se presentan los resultados de los análisis físicos y químicos realizados a la muestra de suelo empleadas en esta investigación, todos los análisis fueron realizados por triplicado. Para la interpretación de los resultados se utilizó como patrón de referencia, los datos reportados por Silva ^[50], (anexo 1).

Tabla 2. Análisis Físico y Químico del Suelo

Propiedades Físicas							
Suelo	Humedad (%)		Densidad aparente (g/cm ³)	Granulometría (%)			Textura
	Higroscópica	De Campo		Arena	Arcilla	Limo	
Características de Andisol	19,14	36,06	1,29	71.90	7,69	20.41	Franco arenosa
-	± 0,41	±	± 0,03	±2,93	±0.00	±0.00	-

Propiedades químicas										
pH	C (%)	MO (%)	N (%)	C/N	P (ppm)	Acidez intercambiable meq/100g suelo	Al ³⁺ Intercambiable meq/100g suelo	H ⁺ Intercambiable meq/100g suelo	Ácido titulable meq/100g suelo	CIC meq/100g suelo
5,14	5,73	9,83	0,38	15,08	5,57	0,74	-	0,74	39,24	25,41
±0,05	±0,05	±0,06	±0,01	±0,02	±0,02	±0,03	-	± 0,03	±2,12	±1,89

Bases de cambio (meq/100g suelo)					capacidad de intercambio efectiva (meq/100g)	Microelementos (mg/kg)			
Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	Ca/Mg		Fe ²⁺	Cu ²⁺	Mn ²⁺	Zn ²⁺
3,701	2,845	0,203	0,986	1,3	7,865	7,388	1,235	16,569	3,188
±0,243	± 0,044	±0,002	±0,063	-	-	±0.366	±0.076	±0.617	±0.273

El suelo muestreado en la microcuenca del Río Piedras vereda Quintana corregimiento Quintana, dedicado a ganadería se caracteriza por presentar una alta humedad. El suelo estudiado proveniente de esta zona presenta un color claro, con una humedad higroscópica de 19,14% comprendida dentro del rango normal (15% - 25%). La textura Franco-Arenosa con un contenido bajo en arcillas (7.69%) indica que la retención de humedad se debe principalmente a la materia orgánica (9,83%) presente con un nivel medio. Se aprecia un alto % de arenas >65% y bajo contenido de limos (<28%) indicando que hay pérdida por erosión, no podría haber una distribución uniforme entre la retención de agua y de oxígeno y la difusión de gases. Su densidad aparente (1,29) se asume como alta, se

atribuye al efecto de al alto porcentaje de arenas, puesto que la tendencia general de estas, es aumentar los macroporos en los cuales el agua de percolación se moviliza y puede arrastrar nutrientes y sustancias fúlvicas hacia cuerpos de agua generando problemas de contaminación.

El valor de pH 5,14 clasifica a este suelo como fuertemente ácido, afectando la disponibilidad de muchos nutrientes para la planta como el del fósforo, boro, azufre porque favorece su adsorción en la fase coloidal, como se hace evidente en este análisis un bajo contenido de P (inferior a 20 ppm)

Su acidez se puede atribuir a la MO, ya que la acidez intercambiable es baja sin detectar aluminio de cambio, por lo tanto se debe a especies de Al^{3+} y de H^+ no intercambiables como se demuestra por la alta acidez Titulable. Es probable que el Al esté siendo quelatado fuertemente por la MO.

La capacidad de intercambio catiónico presenta un valor de 25,41 meq/100g de suelo, se considera como un valor normal y es atribuible principalmente a la MO. Se aprecia un nivel medio de Ca^{2+} y un nivel alto de Mg^{2+} que no se corresponde con la fuerte acidez de estos suelos, este fenómeno se podría atribuir ya sea a un enclavamiento en la misma finca o en fincas aledañas, y por percolación pueden llegar a este sitio. La relación Ca/Mg es baja (inferior a 2), indicando que se puede inducir a una fuerte deficiencia de Ca por competición con el Mg por los sitios de entrada a través de la membrana celular. El nivel de sodio es normal para este tipo de suelos ácidos. El nivel de K^+ es alto se puede afirmar que el K^+ suministrado en estos suelos es alto o que también puede provenir por percolación de suelos ubicados en partes más altas. Se observa fuerte deficiencia de micronutrientes con excepción del Zn^{2+} y se atribuye o a pérdidas por lixiviación o a fuerte quelatación por parte de la MO.

El porcentaje de nitrógeno total presente en el suelo es de 0,38, valor medio, sin embargo, no se puede asegurar su disponibilidad puesto que incluye tanto el nitrógeno en forma orgánica como inorgánica. La forma orgánica que representa casi la totalidad del nitrógeno en el suelo no puede ser utilizada por la planta mientras no se transforme previamente en nitrógeno inorgánico, mediante una serie de procesos fundamentalmente de tipo bioquímico, en los cuales influyen factores tales como la temperatura, el pH y la humedad. Teniendo en cuenta la relación C/N 15.08 los microorganismos no mineralizan N porque tendrían suficiente, o el proceso de mineralización se puede tornar lento.

La prueba de presencia de alófanos arroja un valor de pH de 9.4 indicando presencia de estos materiales amorfos propios de Andisoles, los cuales pueden generar la fuerte acidez de estos suelos al mismo tiempo que retienen el P generando su fuerte deficiencia.

5.2 FRACCIONAMIENTO DE LA MATERIA ORGÁNICA

En la tabla 3 se muestran los resultados del fraccionamiento de la MOS, separados por el método granulométrico, en ella se reportan los porcentajes de cada fracción y el contenido de carbono y MO de cada una.

Tabla 3. Porcentaje de materia orgánica fresca y humificada

Muestra	% En peso	% CO	% MO
MOH	40,66	9,22	15,9
MOF	21,53	3,07	5,3

En esta tabla se observa que el porcentaje en peso de la MOH es casi dos veces el valor de la MOF, esto indica que en dicho suelo predomina el carbono de material humificado sobre el de la materia orgánica fresca; sin embargo la proporción de MOH es menor de 50% lo que indica una baja tasa de humificación de este sistema edáfico ^[51].

Comparando los valores de MO en ambas fracciones, su incremento en la fracción de MOH es atribuido a un mayor contenido de carbono fácilmente oxidable presente en las sustancias húmicas: ácidos fúlvicos, húmicos y huminas en esta fracción.

En la tabla 4 se muestra el contenido de carbono de las diferentes sustancias húmicas, en ella también se reporta el porcentaje de MO y grado de humificación.

Tabla 4. % CO, % MO de las sustancias húmicas y grado de humificación de la MOH

SH	% C	% MO	HI	HR ₁	HR	% HA
AH	0,98	1,70				
FF	0,64	1,10	1.89	1,53	65,1	26,27
H	4,25	7,76				

HR= C MOH/ Ctotal; HR₁ = AH/FF; HI = CMOF/CAH+CAF (Índice de Sequi); %HA = CAH/ CMOH ^[52].

El índice de Sequi es superior a 0,3 indicando un bajo grado de humificación. En estudios de diversos materiales Senesi, (1989) establece ciertos límites para este índice. Generalmente, en los suelos su valor siempre resulta inferior a 1; en los horizontes de suelos con un alto grado de humificación, tiende a cero ^[52].

El grado de humificación ($HR_1 = 1,53$) es mayor a 1 lo que indica el predominio de los ácidos húmicos con respecto a las sustancias fúlvicas, reflejando la formación de especies estructuralmente más complejas. Los valores mayores a 1 en dicha relación indican un mayor desarrollo de la estructura molecular de los compuestos húmicos, lo cual supone una normal actividad biológica por parte de los microorganismos del suelo en el proceso de humificación de la MOS. Sin embargo, el alto contenido de carbono de las huminas en comparación con las demás sustancias húmicas evidencia un bajo desarrollo de este suelo, el cual se corrobora con el porcentaje de carbono de los ácidos húmicos (% AH), que representa solo el 26,27% del carbono de la MOH, también con el valor superior a 0,3 en el índice de Sequi ^[52].

La relación de humificación indica que el 65,1% del carbono de la MOS se encuentra en la MOH, corroborando de esta manera que a pesar de que la tasa de humificación es baja (40,66%) predomina el carbono de las sustancias húmicas ^[52].

5.3 FERTILIZACIÓN DEL SUELO

Se seleccionaron dos tipos de fertilizantes fosfatados, ambos son de conocido uso comercial en el departamento del Cauca: Triple 15 y fosfato diácido de potasio (KH_2PO_4) con una composición de 15 y 52% de fósforo expresado en forma de P_2O_5 , respectivamente.

Se evaluó el requerimiento de fertilizante necesario para llevar el nivel de P disponible del suelo hasta 30 ppm, con base a esto se seleccionó la dosis necesaria de fertilizante para alcanzar dicho nivel de P en 100g de suelo. Los resultados se muestran en la tabla 5.

Tabla 5. Dosis necesaria de fertilizante para alcanzar 30ppm de P disponible

Fertilizante	Dosis*(g)	Dosis (Ton/Ha)
Triple 15	0,2	2.58
KH_2PO_4	0,06	0.77

* Masa de fertilizante necesaria para llevar la concentración de P disponible de 100g de suelo hasta 30ppm.

5.4 EVALUACIÓN DEL EFECTO DE LA FERTILIZACIÓN SOBRE LA ACTIVIDAD DE LA FOSFATASA ÁCIDA COMO INDICADOR DE LA CALIDAD DE UN SUELO CORRESPONDIENTE A UNA MICROCUENCA DEL RÍO PIEDRAS

Con el propósito de evaluar el efecto de la fertilización sobre la calidad del suelo, se seleccionó como indicador bioquímico la actividad de la fosfatasa ácida, porque el suelo seleccionado es fuertemente ácido y presenta serias deficiencias de P. Para la realización de esta investigación se seleccionó este tipo de indicador ya que brinda información a corto plazo; pues según García (2003) la existencia, deficiencia o cambios en las actividades enzimáticas pueden ser consideradas como una “alerta temprana” ante un posible colapso ambiental, permitiéndonos entonces reaccionar a tiempo antes de que pueda ocurrir un daño irreversible para el mencionado suelo [35].

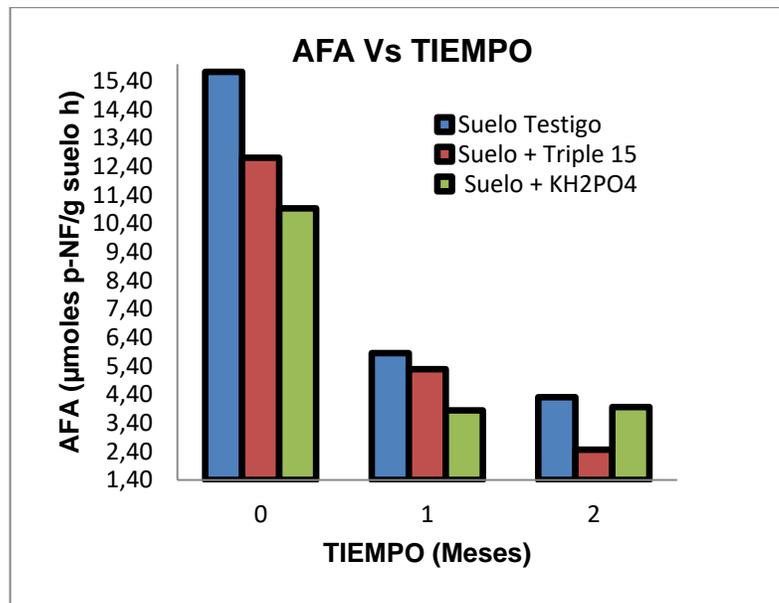
De esta manera se evaluó, la AFA, el fósforo en sus diferentes formas, el pH del suelo y el contenido de MO realizando un seguimiento mensual en tres tiempos para así observar el efecto de la fertilización en cada uno de los tratamientos. Se realizaron tres tratamientos que corresponden: el primero al suelo sin fertilizar como testigo (T1), como segundo el mismo suelo fertilizado con Triple 15 (T2) y finalmente como tercero el mismo suelo fertilizado con fosfato diácido de potasio (T3), para estos dos últimos tratamientos la dosis de fertilizante utilizada son las reportadas en la tabla 5. Los resultados de la AFA para los distintos tratamientos se muestran en la tabla 6 y en la figura 15.

Tabla 6. Efecto de la fertilización sobre la actividad de la fosfatasa ácida

Tratamiento	AFA (μ moles p-NF/g suelo h)*		
	Tiempo 0 (meses)	Tiempo 1 (meses)	Tiempo 2 (meses)
T1 =Suelo Testigo	15,73 \pm 1,01	5,85 \pm 0,33	4,3 \pm 0,31
T2 =Suelo + Triple15	12,71 \pm 0,54	5,29 \pm 0,021	2,46 \pm 0,16
T3= Suelo + KH₂PO₄	10,93 \pm 0,81	3,84 \pm 0,23	3,96 \pm 0,29

* La AFA se expresa en μ moles p-NF/g h, que representa la cantidad en micromoles de p-Nitrofenol formado por gramo de suelo por hora.

Figura 15. Efecto de la fertilización sobre la actividad de la fosfatasa ácida en función del Tiempo.

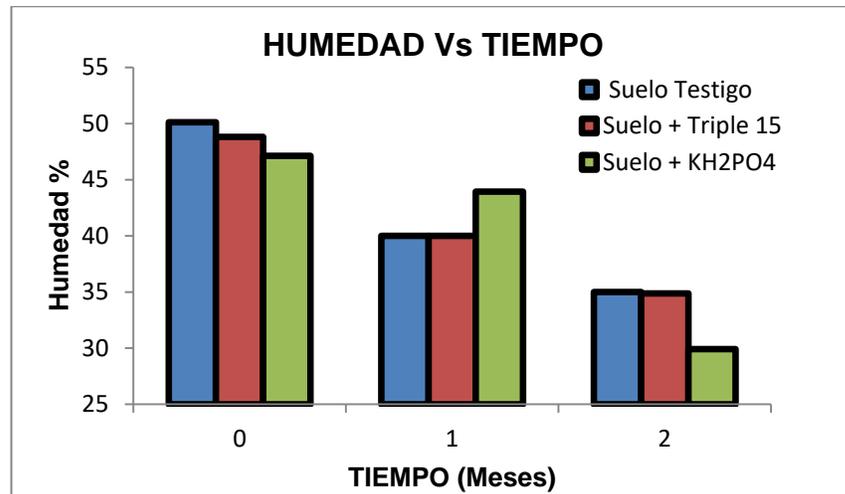


En la figura 15, se puede observar que para todos los tratamientos la AFA decrece en función del tiempo, aún en el tratamiento del suelo testigo, atribuible a disminución significativa en la humedad como se aprecia en la tabla 7 y figura 16

Tabla 7. Comportamiento de la humedad de cada tratamiento en función del tiempo.

Tratamiento	Humedad (%)		
	Tiempo 0 (meses)	Tiempo 1 (meses)	Tiempo 2 (meses)
T1 =Suelo Testigo	50,12 ± 1,71	40,01 ± 2,30	35,00 ± 1,64
T2 =Suelo + Triple 15	48,81 ± 0,85	40,38 ± 0,65	34,88 ± 1,84
T3= Suelo + KH₂PO₄	47,13 ± 0,45	43,95 ± 1,90	29,91 ± 1,30

Figura 16. Comportamiento de la humedad de cada tratamiento en función del tiempo.

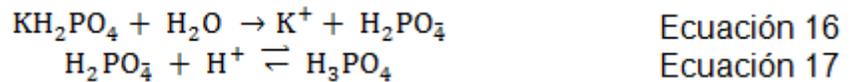


El porcentaje de humedad del suelo en cada tratamiento es decreciente en todo el tiempo del experimento (figura 16), lo que hace que la solución del suelo se concentre. Esto hace que el pH disminuya, es decir, la humedad ejerce un efecto indirecto sobre la actividad enzimática de la fosfatasa ácida, pues una disminución en su nivel implica un descenso en los valores de pH y por ende esto justifica el descenso en la actividad del suelo testigo. Al inicio de la investigación el pH del suelo testigo fue de 5,30 y al final el valor descendió hasta 4,88 lo que justifica el descenso de la AFA, esto se atribuye al estrés generado por el efecto indirecto del porcentaje de humedad. Iguaes resultados encontraron Sardans *et al* (2008), ellos refieren que la disminución del contenido de agua del suelo redujo la AFA, atribuible al estrés hídrico que genera el déficit de agua y a los efectos que esto acarrea como lo es la concentración de la solución del suelo [53].

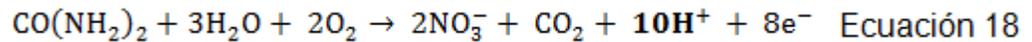
En la figura 15, se muestra que el suelo fertilizado con fosfato diácido de potasio (T3) (línea verde) registra un pequeño incremento del tiempo 1 al tiempo 2. Además se observa que en este lapso de tiempo la actividad, para este tratamiento, supera a la del suelo fertilizado con Triple 15 (T2) pero no a la del suelo testigo (T1). Este fenómeno puede atribuirse al efecto que ejerce el tratamiento sobre el pH y por ende el pH sobre la AFA. En la figura 17, se muestra que el suelo testigo (T1) (línea azul) y el suelo + KH₂PO₄ (T2) registraron las menores variaciones de pH a lo largo de la investigación, además no presentan diferencia significativa entre sus valores de pH en función del tratamiento (tabla 13), pero ambos difieren significativamente con el pH del suelo fertilizado con Triple 15 (T2). Este último registró los menores valores y mostró un comportamiento decreciente a lo largo de todo el experimento. Lo anterior se debe que al usar Triple 15 (Fertilizante Compuesto) como fuente de fósforo

inevitablemente también se le introduce nitrógeno al suelo, el cual en su proceso de nitrificación libera protones hacia la solución del suelo, que producen acidez. El grado de acidez que inducen los fertilizantes nitrogenados depende de la fuente de nitrógeno que se utilice. Adicional a esto se suma la acidez generada por la reacción de la fuente de fósforo [33]. Las reacciones que justifican porque estos fertilizantes disminuyen el pH de la solución del suelo se muestran en ecuaciones 16, 17 y 18.

Acidez generada por fertilizantes fosfatados.



Acidez generada por fertilizantes nitrogenados.



Sabiendo que las enzimas son proteínas, cualquier cambio brusco de pH puede alterar el carácter iónico de los grupos amino y carboxilo en la superficie proteica, afectando así sus propiedades catalíticas [57]. A pH alto o bajo se puede producir la desnaturalización de la enzima y en consecuencia su inactivación. La fosfatasa ácida presenta su máxima actividad en un rango de pH comprendido entre 5.7 y 6.4 [47] [48], lo que corrobora la correlación significativa y positiva entre la AFA respecto al pH (Coef. 0,370*, Anexo 2 Tabla 14); es decir, la disminución del pH hace que la AFA disminuya significativamente.

Del mismo modo en la figura 15 se observa que la AFA del suelo testigo es superior a la de los suelos fertilizados durante todo el tiempo de la investigación; iguales resultados obtuvieron Kang y Freeman (1999), ellos refieren que hubo una relación negativa entre el contenido de fosfato y la actividad enzimática de la fosfatasa ácida [54]. De acuerdo con Guija *et al.*, 2007; Trasar *et al.*, 2003; Halstead., 1964; Juma & Tabatabai, 1978, la disminución de la AFA para los suelos fertilizados en función del tiempo es atribuible al efecto inhibitor de tipo competitivo que ejerce el fósforo inorgánico sobre la actividad enzimática de fosfatasa ácida [40] [43] [55] [56].

Con fin de evaluar estadísticamente el efecto que ejerce la fertilización sobre la AFA, los datos fueron sometidos a la prueba estadística de Shapiro-Wilk para verificar si los datos en función del tratamiento y del tiempo se ajustan o no a la normalidad (Anexo 2, tabla 7 y 8, respectivamente). Para la AFA en función del tratamiento sus datos no se ajustan a la normalidad ($p < 0,05$), pero si en función del tiempo ($p > 0,05$); por tanto se decide realizar pruebas no paramétricas y paramétricas, respectivamente.

La prueba de Kruskal-Wallis (Anexo2, Tabla10), muestra que para la AFA en función del tratamiento no presenta diferencia significativa ($p = 0,067$); sin embargo la prueba estadística Rho de Spearman muestra que existe correlación negativa y significativa entre la AFA y la fertilización (Coef. $-0,339^*$), por eso fue necesario evaluar el efecto que ejerce el tratamiento sobre la AFA en cada uno de los tiempos que se colectaron los datos.

Las pruebas de normalidad para AFA en función del tratamiento para cada tiempo por separado se reportan en el Anexo 2, Tabla 13, en ella se muestra que todos los datos se ajustan a una distribución normal. El ANOVA para la AFA en función del tratamiento para cada tiempo (Anexo 2, Tabla14) muestra que sí se presentan diferencias significativas entre el suelo testigo y los suelos fertilizados, contrario a lo que se obtuvo al analizar al efecto del tratamiento sobre la AFA durante todo el tiempo acumulado del experimento. Este efecto se debe al solapamiento que ejerce la humedad sobre la AFA.

En la tabla 8, se muestra la prueba de Duncan para la AFA en función del tratamiento para cada tiempo por separado. Al tiempo cero se muestra que la AFA del suelo testigo (T1) es significativamente superior a la del suelo fertilizado con Triple 15 (T2) y este a su vez superior al suelo fertilizado con fosfato diácido de potasio (T3). Los resultados del tiempo 1 tienen igual comportamiento a los del tiempo cero. En el tiempo 2 la AFA del suelo testigo (T1) es superior a la del suelo fertilizado con fosfato diácido de potasio (T3) pero esta diferencia no es significativa. La menor Actividad la presenta el suelo fertilizado con el Triple 15 (T2)

El fenómeno que se presenta en el tiempo 2 para la AFA entre el tratamiento 1 y 3, se debe a la disminución del nivel de P disponible en el tratamiento 3, el cual registró máxima disponibilidad en el tiempo 1, lo que evidencia que al tiempo 2 el fósforo suministrado por el fertilizante fosfato diácido de potasio se pierde de la solución del suelo ya sea por absorción sobre los coloides minerales, formación del complejos organominerales o inmovilización por microorganismos ^[33]. Este hecho corrobora que la deficiencia de P disponible activa la AFA.

Tabla 8. Prueba Duncan para AFA en función del tratamiento para cada tiempo

	Tratamiento	N	Subconjunto para alfa = .05		
			1	2	3
			TIEMPO 0	3	5
	2	5		12,7086	
	1	5			15,7266
	Sig.		1,000	1,000	1,000
	Tratamiento	N	Subconjunto para alfa = .05		
			1	2	3
			TIEMPO 1	3	5
	2	5		5,2900	
	1	5			5,8500
	Sig.		1,000	1,000	1,000
	Tratamiento	N	Subconjunto para alfa = .05		
			1	2	
			TIEMPO 2	2	5
	3	5		3,9600	
	1	5		4,3040	
	Sig.		1,000	,060	

El Anexo 2, tabla 15 muestra que la humedad de cada tratamiento para cada tiempo por separado se ajusta a una distribución normal. El análisis de varianza de la humedad para los tres tratamientos en el tiempo 0 (Anexo 2, Tabla 16) muestra que no hay diferencias significativas ($p = 0,278$). Esto corrobora que las diferencias significativas de la AFA en función del tratamiento para este tiempo no se debe al efecto de la humedad si no a la fertilización. Sin embargo el descenso de la AFA del suelo testigo durante todo el tratamiento se debe al estrés hídrico que genera el déficit de humedad, atribuible a la dificultad para mantenerla constante durante todo el tiempo del estudio, la cual mostro un comportamiento decreciente.

La tabla 9, muestra los resultados de la prueba de Duncan para la humedad de cada tratamiento para el tiempo 1 y 2. En el tiempo 1 se observa que la humedad del suelo fertilizado con fosfato diácido de potasio (T3) es significativamente superior a la de los otros dos tratamientos (T2 y T1), sin que se presente diferencia significativa entre estos dos últimos. En el tiempo 2 la humedad del suelo testigo (T1) fue superior a la del suelo fertilizado con Triple 15 (T2) pero dicha diferencia no es significativa, sin embargo, ambos difieren significativamente de la humedad del suelo fertilizado con fosfato diácido de potasio (T3) el cual registro la menor humedad. Este hecho corrobora el efecto indirecto que ejerce la humedad sobre la AFA, como ya se mencionó el descenso de la humedad del

suelo hace que el pH de la solución disminuya y por ende también la AFA. Dicho efecto se puede eliminar controlando el porcentaje de humedad del suelo en un valor constante a lo largo de todo el experimento.

Tabla 9. Prueba Duncan para AFA en función del tratamiento para el tiempo 1 y 2

TIEMPO 1	Tratamiento	N	Subconjunto para alfa = .05	
			1	2
	1	5	40,0060	
2	5	40,3760		
3	5		43,9480	
Sig.			,785	1,000

TIEMPO 2	Tratamiento	N	Subconjunto para alfa = .05	
			1	2
	3	5	29,9140	
2	5		34,8780	
1	5		35,0000	
Sig.			1,000	,949

La tabla 10 muestra las correlaciones existentes entre la AFA, la humedad y el tratamiento

Tabla 10. Correlación de Pearson para la AFA, humedad y tratamiento

TIEMPO 0		AFA	Humedad	Tratamiento
AFA	Correlación de Pearson	1	,584(*)	-,929(**)
	Sig. (bilateral)	.	,022	,000
	N	15	15	15
Humedad	Correlación de Pearson	,584(*)	1	-,437
	Sig. (bilateral)	,022	.	,103
	N	15	15	15
TIEMPO 1		AFA	Humedad	Tratamiento
AFA	Correlación de Pearson	1	-,723(**)	-,933(**)
	Sig. (bilateral)	.	,002	,000
	N	15	15	15
Humedad	Correlación de Pearson	-,723(**)	1	,623(*)
	Sig. (bilateral)	,002	.	,013
	N	15	15	15

TIEMPO 2		AFA	Humedad	Tratamiento
AFA	Correlación de Pearson	1	-,103	-,168
	Sig. (bilateral)	.	,716	,549
	N	15	15	15
Humedad	Correlación de Pearson	-,103	1	-,582(*)
	Sig. (bilateral)	,716	.	,023
	N	15	15	15

** La correlación es significativa al nivel 0,01 (bilateral).

* La correlación es significante al nivel 0,05 (bilateral).

El comportamiento de las correlaciones de Pearson para la AFA, con la humedad muestra que la fosfatasa ácida tiene un rango de humedad donde la actividad es óptima; el efecto que ejerce el porcentaje de la humedad del suelo sobre la AFA puede eliminarse controlándola durante todo el tiempo de la investigación en un valor constante.

El ANOVA de un factor – prueba paramétrica- (Anexo2, Tabla 11) para la AFA en función del tiempo, muestra que sí existen diferencias significativas ($p = 0,00$) de la actividad en función del tiempo; la Prueba de Duncan (tabla 11) muestra que la AFA difiere significativamente en los tres tiempos, así: la menor AFA se presenta en el tiempo 2, seguida por la actividad del tiempo 1 y finalmente con una mayor AFA presentada en tiempo 0, corroborando así los datos que se grafican en la figura 15.

Tabla 11. Prueba Duncan para AFA en función del tiempo

Tiempo	N	Subconjunto para alfa = .05		
		1	2	3
Duncan(a)	2,00	15	3,5741	
	1,00	15		4,9933
	,00	15		13,1226
Sig.			1,000	1,000

Adicional a esto se evaluó estadísticamente la correlación de la AFA con el tratamiento (Anexo 2, Tabla 18); en ella se observa que la correlación es negativa y significativa respecto al tratamiento (Coef. -0,339*), es decir, la adición de fertilizantes fosfatados para suplir las necesidades del suelo hace que la AFA disminuya significativamente. Este resultado concuerda con lo que exponen Guija y colaboradores (2007), ellos refieren que el fosfato inorgánico presente o liberado durante la catálisis por la fosfatasa ácida, se comporta como un inhibidor de tipo competitivo [40]. Además con el P disponible en cantidad suficiente, los microorganismos no tienen la necesidad de mineralizar Po ya que no presentan estrés nutricional por deficiencias de este elemento y por lo tanto la AFA disminuye.

Se observa en la Tabla 19 (Anexo 2), una correlación negativa altamente significativa (Coef. -0,879**); de la AFA con el tiempo; es decir, la adición de fertilizantes fosfatados para suplir las necesidades del suelo, hace que la AFA disminuya significativamente a medida que avanza el tiempo. Esto puede explicarse debido a que la solubilización del P inorgánico presente en los fertilizantes usados para llevar el nivel de P disponible hasta 30 ppm no es inmediata si no que está gobernada por una cinética de solubilización que depende de la reacción del suelo, la temperatura, del tamaño de partícula, la relación agua: fertilizante, entre otros, es decir, son fertilizantes de liberación lenta [33].

Del análisis anterior se podría deducir que el efecto de la fertilización con los dos fertilizantes evaluados sobre la AFA, es significativo y negativo, independientemente de la fuente de fósforo que se aplique. Similares resultados obtuvieron Acosta *et al.*, (2005) ellos refieren que las fosfatasas son significativamente afectadas por el pH y la disponibilidad de fósforo, también Arzuaga *et al.*, (2005) reporta que la aplicación de fertilizantes deprimió la actividad enzimática de la fosfatasa ácida, Cruz *et al.*, (2005) afirman que el estrés por carencia de fósforo aumenta la actividad enzimática de las fosfatasas. Corroborando de esta manera la relación negativa entre la AFA y el fósforo disponible [57] [58] [59].

5.5 RELACIÓN DEL ESTADO DE HUMIFICACIÓN CON LA AFA

La AFA para el suelo testigo en el tiempo 0 es 15.73 μ moles p-NF/g suelo h (Tabla 6); teniendo en cuenta que la profundidad del muestreo fue de 0-10 cm este valor se cataloga como alto; pues según Speir (1977) y Speir & McGill (1979), citados por García (2003), los valores de la AFA para suelos de pradera colectados en el horizonte A oscila entre 3,8 y 9,1 (Anexo 3, Tabla 21) [60]. Este fenómeno es atribuible al bajo grado de humificación de la MO como se evidencio por el alto valor del índice de Sequi (1,98), a pesar que el grado de humificación HR₁ es alto (1,53), es decir, que hay calidad de la MOH pero no cantidad.

Sarapatka (2003) refiere que la correlación entre la AFA y el índice HR₁ es negativa pues el alto grado de condensación de los ácidos húmicos en comparación de los ácidos fúlvicos, le confiere mayor estabilidad al complejo fosfatasa- ácido húmico. Es decir que la AFA disminuye a medida que el índice HR₁ aumenta. Sin embargo el índice de Sequi es demasiado alto (>0,3) lo que evidencia la poca cantidad de MOH; lo que permite inferir que la absorción de la fosfatasa sobre las sustancias húmicas es baja, y por tanto esto explica el alto grado de la AFA.

5.6 EVALUACIÓN DEL EFECTO DE LA FERTILIZACIÓN SOBRE PARÁMETROS QUÍMICOS DEL SUELO

Para evaluar el efecto que ejerce la fertilización, usando Triple15 y fosfato diácido de potasio como fuente de fósforo, sobre las propiedades del suelo se midieron los parámetros de: pH, P disponible, P orgánico, y P total y MO.

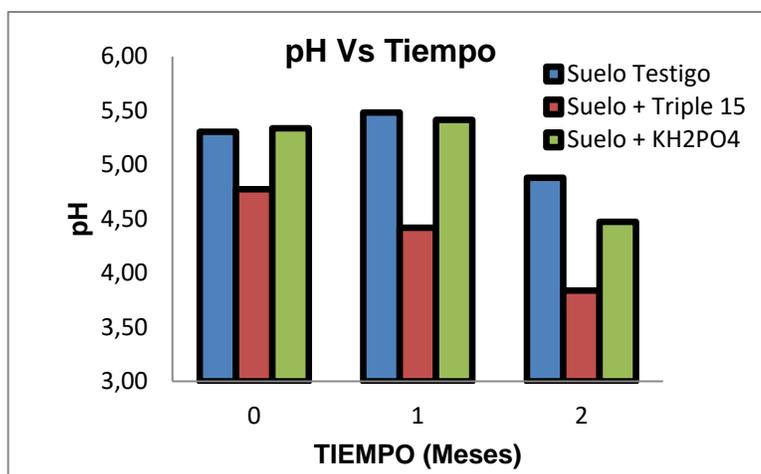
5.6.1 Efecto de la fertilización sobre el pH en función del tiempo

Los resultados se representan en la tabla 12 y figura 17.

Tabla 12. Efecto de la fertilización el pH

Tratamiento	pH		
	Tiempo 0 (meses)	Tiempo 1 (meses)	Tiempo 2 (meses)
T1 = Suelo Testigo	5,30 ± 0,01	5,48 ± 0,23	4,88 ± 0,09
T2 = Suelo + Triple15	4,77 ± 0,01	4,42 ± 0,07	3,84 ± 0,03
T3 = Suelo + KH₂PO₄	5,34 ± 0,01	5,41 ± 0,08	4,47 ± 0,04

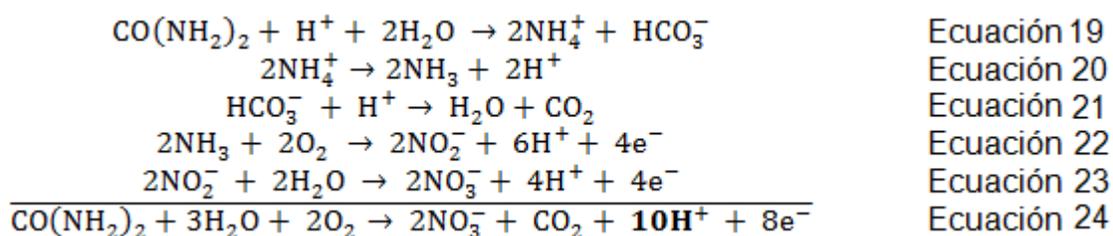
Figura 17. Efecto de la fertilización sobre el pH



En la figura 12, se muestra que el suelo testigo (T1) y el suelo + KH₂PO₄ (T3), (línea azul y verde, respectivamente) registraron las menores variaciones de pH a

lo largo de la investigación. Además no presentan diferencia significativa entre sus valores de pH en función del tratamiento (Tabla 13), pero ambos difieren significativamente con el pH del suelo fertilizado con Triple 15 (**T2**), el cual registró los menores valores y mostró un comportamiento decreciente a lo largo de todo el experimento. Lo anterior se debe que al usar Triple 15 como fuente de fósforo inevitablemente también se le introduce nitrógeno al suelo, el cual en su proceso de nitrificación libera protones hacia la solución del suelo, que producen acidez. El grado de acidez que inducen los fertilizantes nitrogenados depende de la fuente de nitrógeno que se utilice. Adicional a esto se suma la acidez generada por la reacción del la fuente de fósforo [33]. Las reacciones que justifican porque estos fertilizantes disminuyen el pH de la solución del suelo se muestran a continuación.

Acidez generada por un fertilizante nitrogenado (Urea): *nitrificación del amoniaco*



Acidez generada por fertilizantes fosfatados (Fosfato diácido de potasio).

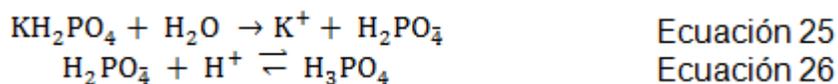


Tabla 13. Prueba de Tukey para el pH en función del tratamiento

Tratamiento	N	Subconjunto para alfa = .05	
		1	2
HSD de Tukey(a)	2	4,3433	5,0740
	3		
	1		
	15	1,000	,549
Sig.			

En función del tiempo la prueba de Tukey (Tabla 14) muestra que a tiempo 0 se registró el mayor valor de pH, seguido del tiempo 1, sin que hayan diferencias significativas entre estos tiempos, sin embargo ambos difieren significativamente del tiempo 2, que fue el tiempo donde se registró el menor valor del pH.

Tabla 14. Prueba de Tukey para el pH en función del tiempo

Tiempo	N	Subconjunto para alfa = .05	
		1	2
HSD de Tukey(a)	2	15	4,3967
	1	15	5,1047
	0	15	5,1380
Sig.			1,000
			,975

La prueba Rho de Spearman (Anexo 2, Tablas 18 y 20, respectivamente) muestra que la correlación entre el pH y el tratamiento es negativa pero no significativa (Coef. -0,50). Por el contrario la correlación entre el pH y el tiempo es negativa altamente significativa (Coef. -0,483**), es decir, la fertilización no afecta significativamente el pH de manera instantánea; no obstante lo afecta significativamente a medida que avanza el tiempo.

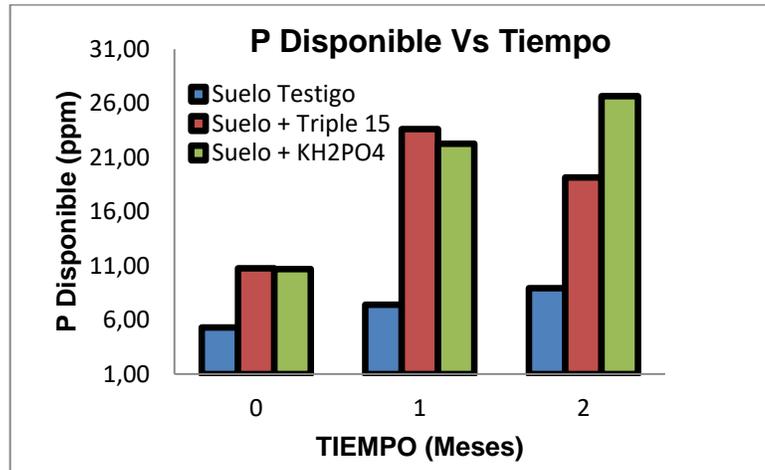
5.6.2 Efecto de la fertilización sobre el nivel del P disponible en función del tiempo

Los resultados se representan en la tabla 15 y figura 18.

Tabla 15. Efecto de la fertilización sobre el P disponible

Tratamiento	P disponible (ppm)		
	Tiempo 0 (meses)	Tiempo 1 (meses)	Tiempo 2 (meses)
T1 = Suelo Testigo	5,30 ± 0,19	7.41 ± 0,26	8,93 ± 0,42
T2 = Suelo + Triple15	10,77 ± 0,49	23,61 ± 1,06	19,16 ± 0,63
T3 =Suelo + KH₂PO₄	10,69 ± 0,25	22,26 ± 1,40	26,66 ± 1,45

Figura 18. Efecto de la fertilización sobre el P disponible



En la figura 18, se aprecia que en el tiempo 0 la fertilización con ambas fuentes de fósforo produce un incremento en el nivel de P disponible, siendo ligeramente superior este efecto en el suelo fertilizado con Triple 15 (línea roja).

En dicha figura se observa que el suelo fertilizado con Triple 15 (T2) alcanzan el máximo nivel de fósforo disponible en el tiempo 1 y a partir de este momento hasta el tiempo 2 la concentración de este parámetro disminuye; lo contrario sucede en el suelo testigo (línea azul) y el suelo tratado con fosfato diácido de potasio (T3), que muestran un comportamiento creciente durante todo el tiempo del experimento.

El comportamiento de la disponibilidad del fósforo en función del tiempo (figura 18) es atribuible a las variaciones de pH que inducen los fertilizantes en el suelo; pues el óptimo rango de pH del suelo dentro del cual se observa la máxima disponibilidad de fósforo se encuentra entre el rango de 6,5 y 7,5 ^[33]. Las causas de este comportamiento se asocian fundamentalmente a que en este rango ocurre la máxima solubilidad de las formas de fósforo inorgánico. A valores de pH por debajo del rango óptimo, se reduce la solubilidad debido a la formación de sales inorgánicas insolubles como los fosfatos de hierro y aluminio ^[34] y se aumenta la capacidad de intercambio aniónico aumentando así la retención de este nutriente en la fase coloidal ^[33]. Las reacciones que justifican la variación del pH en función del tiempo debido a la fertilización se muestran en las ecuaciones 24y 26. Lo anterior corrobora la correlación significativa y negativa existente entre el pH y el P disponible (Coef. - 0,471*).

La variación del fósforo disponible del suelo testigo en función del tiempo, es atribuible a que la concentración de este parámetro en el suelo, no es un valor único y constante, sino que es una variable dinámica fuertemente influenciada

por las características propias del suelo, de la reacción del suelo y las condiciones ambientales ^[34].

La prueba estadística de Shapiro-Wilk muestra que el P disponible en función del tratamiento y el tiempo no se ajustan a la normalidad (Anexo 2, Tablas 7 y 8, respectivamente); por tanto se aplicaron pruebas no paramétricas (Prueba de Kruskal Wallis) para este parámetro en función de ambas variables, los resultados se muestra en el anexo 2, tablas 10 y 12, respectivamente.

La prueba de Tukey con variable de agrupación tratamiento (Tabla 8), muestra que el mayor nivel de P disponible se logró en los suelos fertilizados, sin que haya diferencias significativas entre estos dos tratamientos; sin embargo ambos difieren significativamente con el suelo testigo, el cual presentó el menor contenido de P disponible. Este fenómeno es atribuible a que independientemente del fertilizante que se use, el objetivo que se busca con la fertilización es aumentar la disponibilidad del P disponible ^[33]. Sin embargo, desde el punto de vista ambiental, es preferible utilizar la fuente de KH_2PO_4 porque como se demostró anteriormente el Triple 15 genera más acidez al suelo, y en estas condiciones es posible generar gases efecto invernadero por la fuente de N que él presenta ^[21].

Del mismo modo la prueba de Tukey en función del tiempo (Tabla 16) muestra que la mayor concentración de P disponible se obtuvo en el tiempo 2 seguida por la del tiempo 1, sin que haya diferencias significativas entre estos dos tiempos; sin embargo ambos difieren significativamente del tiempo 0, que presentó la menor concentración de P disponible; esto corrobora el comportamiento que describen los diferentes tratamientos en la figura 18.

Tabla 16. Prueba de Tukey para P disponible en función del tiempo y tratamiento

Tratamiento	N	Subconjunto para alfa = .05	
		1	2
HSD de 1,00	15	7,2116	17,8473
Tukey(a) 2,00			
3,00			
Sig. ,549			
		1,000	
Tiempo	N	Subconjunto para alfa = .05	
		1	2
HSD de 0,00	15	8,9178	17,7615
Tukey(a) 1,00			
2,00			
Sig. ,976			
		1,000	

Según la prueba estadística Rho de Spearman que se muestra en el anexo 2, tablas 18 y 20, respectivamente, el P disponible presenta una correlación positiva altamente significativa con el tratamiento y el tiempo (Coef. 0,767**; Coef. 0,405**, respectivamente), es decir, la fertilización incrementa significativamente la concentración del P disponible ^[33], el cual va aumentando a medida que avanza el tiempo.

De lo anterior se podría inferir que independiente de la fuente de fósforo que se utilice como fertilizante, lo que se busca con la fertilización, es cubrir la cantidad de fósforo necesaria para corregir el déficit nutricional o diferencia entre los requerimientos del cultivo y el suministro de P disponible por parte del suelo ^[34]. No obstante, la reacción del suelo se ve afectada por el tipo de fertilizante que se use; por ejemplo, cuando se usan fertilizantes compuestos, en este caso con fuentes de N, el pH de la solución del suelo disminuye a valores más bajos que si se usara solo fertilizantes simples; pues el proceso de nitrificación contribuye con protones que generan acidez.

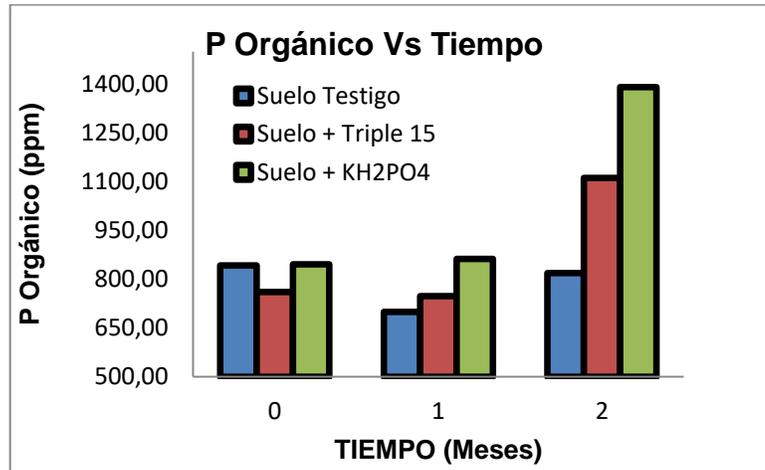
5.6.3 Efecto de la fertilización sobre el nivel del P orgánico en función del tiempo

Los resultados se representan en la tabla 17 y figura 19.

Tabla 17. Efecto de la fertilización sobre el P orgánico

Tratamiento	P Orgánico (ppm)		
	Tiempo 0 (meses)	Tiempo 1 (meses)	Tiempo 2 (meses)
T1 = Suelo Testigo	842,61 ± 45,90	699,64 ± 4,95	818,78 ± 31,48
T2 = Suelo + Triple15	760,69 ± 33,85	747,74 ± 33,77	1111,70 ± 24,62
T3 = Suelo + KH₂PO₄	845,82 ± 24,57	862,71 ± 48,48	1391,24 ± 85,38

Figura 19. Efecto de la fertilización sobre el P orgánico



En la figura 19, se observa que para el suelo fertilizado con fosfato diácido de potasio (línea verde), la concentración de Po aumenta lentamente desde el tiempo 0 al tiempo 1; y para el suelo testigo y fertilizado con Triple 15 (línea azul y roja, respectivamente) disminuye un poco en este lapso del tiempo. A partir del mes 1 se observa un rápido incremento en el contenido del Po en todos los tratamientos el cual es significativamente mayor a los otros dos tiempos, con excepción del suelo testigo, que en el tiempo 2 aumenta pero no alcanza el nivel que se tenía en el tiempo 0 (Tabla 9).

El aumento en la concentración de fósforo orgánico puede atribuirse, puesto que gracias al aumento de P disponible, los microorganismos lo pueden asimilar e incorporar a su propio metabolismo, de esta manera aumenta la concentración del P orgánico. Resultados similares reporta Arzuaga et al., (2005), ellos refieren un incremento hasta del 50% del P orgánico en muestras de suelo fertilizadas con fosfatos inorgánicos; atribuible que parte de este fósforo pudo pasar a formas orgánicas por la absorción por parte de los cultivos, e incorporarse como residuos y raíces, o inmovilizarse por los microorganismos del suelo; además ellos concluyen que el empleo de fertilizantes fosforados influye en mantener e incrementar los reservorios de P orgánico y el P total del suelo fertilizado respecto a las situaciones naturales ^[58].

Con el fin de evaluar estadísticamente el comportamiento del Po en función de la fertilización se realizó la prueba de Shapiro-Wilk; los resultados se reportan en el anexo 2 tablas 7 y 8. En ella se muestra que el Po en función del tratamiento no se ajustan a una distribución normal ($p < 0,05$); no obstante en función del tiempo sí se ajustan a la normalidad ($p > 0,05$).

La prueba de Kruskal-Wallis (Anexo 2, Tabla 10) en función del tratamiento muestra que existen diferencias significativas ($p = 0,02$) para el Po en función de

esta variable. La prueba de Tukey, cuyos resultados se reportan en la tabla 18 muestra que el mayor contenido de Po se presenta en los suelos fertilizados, sin que haya diferencia significativa entre ellos, sin embargo ambos difieren significativamente del suelo testigo; el cual presentó menor contenido de Po.

Tabla 18. Prueba de Tukey para el P orgánico en función del tratamiento

Tratamiento	N	Subconjunto para alfa = .05	
		1	2
HSD de Tukey(a) 1,00	15	787,0075	
2,00	15	873,3751	873,3751
3,00	15		1033,2563
Sig.		,431	,065

El ANOVA (Anexo 2, Tabla 11) muestra que existen diferencias significativas para el P orgánico en función del tiempo ($p = 0,000$). La prueba de Duncan, cuyos resultados se reportan en la tabla 19 revela que el Po presenta el mayor contenido en el tiempo 2; el cual difiere significativamente del tiempo 0 y 1, estos dos últimos tiempos presentan el menor contenido de Po, pero no hay diferencia significativa entre ellos.

Tabla 19. Prueba de Duncan para el P orgánico en función del tiempo

Tiempo	N	Subconjunto para alfa = .05	
		1	2
Duncan(a) 1,00	15	770,0278	
,00	15	816,3719	
2,00	15		1107,2391
Sig.		,408	1,000

La prueba estadística Rho de Spearman (Anexo 2, Tabla 18) muestra que existe una correlación altamente significativa y positiva entre la concentración de Po y el tratamiento (Coef. 0,513**). Corroborando de esta manera que la fertilización incrementa significativamente la concentración del Po.

La prueba de Pearson (Anexo2, tabla 19) muestra que la correlación existente entre la concentración del Po y el tiempo es positiva altamente significativa (Coef. 0,567**). Es decir, a medida que avanza el tiempo los niveles de Po se incrementan significativamente.

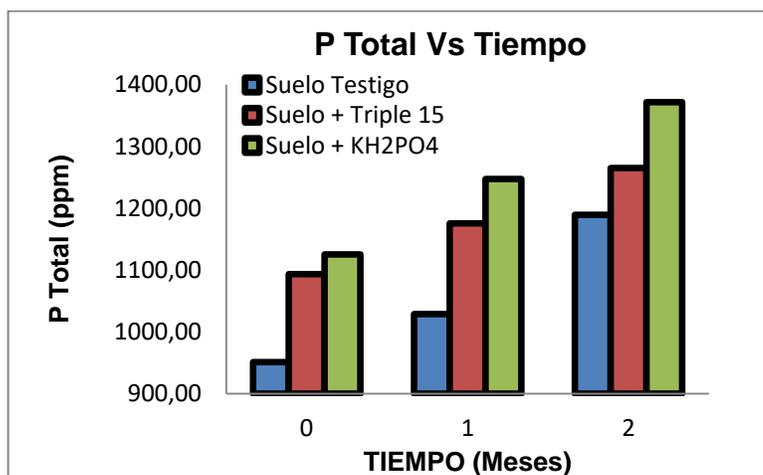
5.6.4 Efecto de la fertilización sobre el nivel del P Total en función del tiempo

Los resultados se representan en la tabla 20 y figura 20.

Tabla 20. Efecto de la fertilización sobre el P Total

Tratamiento	P Total (ppm)		
	Tiempo 0 (meses)	Tiempo 1 (meses)	Tiempo 2 (meses)
T1 = Suelo Testigo	951,00 ± 59,33	1028,74 ± 35,87	1189,46 ± 28,74
T2 = Suelo + Triple 15	1093,33 ± 77,68	1175,45 ± 47,76	1265,07 ± 38,19
T3 = Suelo + KH ₂ PO ₄	1125,36 ± 79,61	1247,27 ± 77,85	1371,58 ± 50,82

Figura 20. Efecto de la fertilización sobre el P Total



En la figura 20, se observa que durante todo el tiempo del experimento la concentración del P total para los suelos fertilizados fue mayor que la del suelo testigo; del mismo modo, se observa un comportamiento creciente del P total en función del tiempo para todos los tratamientos. El incremento del P total se podría atribuir a la alta actividad microbiana debido a la mayor disponibilidad de P a medida que avanza el tiempo, conduciendo así a una alta neosíntesis con la consecuente proliferación de sus microorganismos, aumentando de esta manera la concentración de éste parámetro. Arzuaga *et al.*, (2005), afirman que los niveles de P total del suelo es afectado por el material parental o por el agregado de

fertilizantes o abonos; además concluyen que el empleo de fertilizantes fosfatados influyen en mantener e incrementar los reservorios de P total y el P orgánico respecto a las situaciones naturales de los suelos [58].

Con el fin de evaluar estadísticamente el comportamiento del P total en función de la fertilización y del tiempo se realizó la prueba de Shapiro-Wilk; los resultados se reportan en el anexo 2, tablas 7 y 8; respectivamente. En ellas se muestra que para el P total tanto en función del tratamiento como en función del tiempo se ajustan a una distribución normal ($p > 0,05$), por tanto se realizó pruebas paramétricas para identificar posibles diferencias en función de ambas variables.

El ANOVA (Anexo 2, Tablas 9 y 11) muestra que existen diferencias significativas para el P total tanto en función del tratamiento como en función del tiempo ($p < 0,05$).

La prueba de Duncan para el P total en función del tratamiento, cuyos resultados se reportan en la tabla 21, muestra que el mayor contenido de P total se obtuvo en los suelos fertilizados; siendo mayor para el suelo fertilizado con fosfato diácido de potasio, sin presentar diferencia significativa entre ellos; no obstante ambos difieren significativamente con el suelo testigo, el cual presentó el menor contenido de P total. Del mismo modo la prueba de Duncan para el P total en función del tiempo, cuyos resultados se reportan en la tabla 21, muestra que el contenido de P total es significativamente diferente en los tres tiempos; el mayor contenido se obtiene en el tiempo 2, el cual difiere significativamente del contenido del tiempo 1 y este a su vez del contenido registrado en el tiempo 0.

Tabla 21. Prueba de Duncan para el P Total en función del tratamiento y tiempo

Tratamiento	N	Subconjunto para alfa = .05		
		1	2	
Duncan(a) 1,00	15	1056,3965	1177,9497	
2,00	15			
3,00	15			
Sig.		1,000	,084	
Tiempo	N	Subconjunto para alfa = .05		
		1	2	3
Duncan(a) ,00	15	1056,5621	1150,4855	1275,3672
1,00	15			
2,00	15			
Sig.		1,000	1,000	1,000

La prueba de Pearson (Anexo 2, Tablas 17 y 19) muestra que las correlaciones existentes entre la concentración del P total con el tratamiento y el tiempo son positivas altamente significativas (Coef. 0,596** y 0,580**; respectivamente). Es decir, la fertilización aumenta significativamente la concentración del P total a medida que avanza el tiempo.

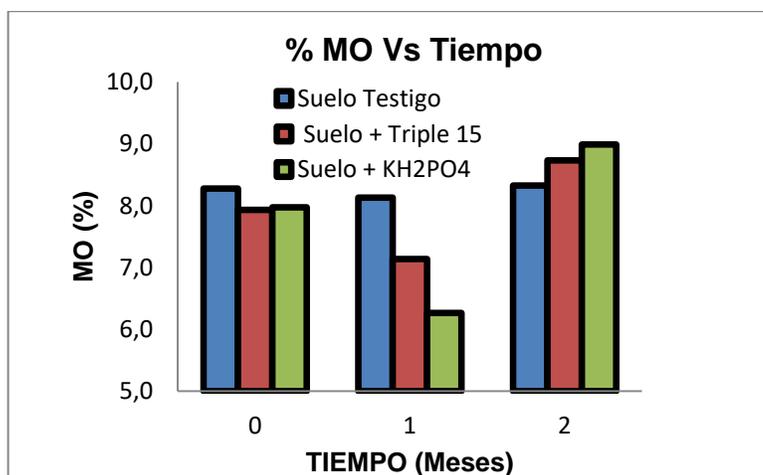
5.6.5 Efecto de la fertilización sobre la MO en función del tiempo

Los resultados se representan en la tabla 22 y figura 21.

Tabla 22. Efecto de la fertilización sobre la MO

Tratamiento	MO (%)		
	Tiempo 0 (meses)	Tiempo 1 (meses)	Tiempo 2 (meses)
T1 = Suelo Testigo	8,28 ± 0,49	8,13 ± 0,28	8,33 ± 0,42
T2 = Suelo + Triple15	7,93 ± 0,42	7,14 ± 0,33	8,73 ± 0,45
T3 = Suelo + KH₂PO₄	7,97 ± 0,24	6,26 ± 0,20	8,99 ± 0,33

Figura 21. Efecto de la fertilización sobre la MO



En la figura 2, se observa que en el tiempo 0 y 1 el porcentaje de MO para los suelos fertilizados es menor al suelo testigo; observándose un comportamiento

decreciente en este lapso de tiempo para todos los tratamientos. A partir del tiempo 1 al tiempo 2 todos los tratamientos describen un comportamiento creciente; al final del experimento el porcentaje de MO los suelos fertilizados supera a la del suelo testigo.

La prueba de Shapiro-Wilk para la MO en función del tratamiento y del tiempo (Anexo 2, Tablas 7 y 8, respectivamente) muestra que los datos se ajustan a una distribución normal ($p > 0,05$); el estadístico de ANOVA (Anexo 2, Tablas 9 y 11, respectivamente) muestra que no hay diferencias significativas para los diferentes tratamientos ($p = 0,272$); no obstante si se presentan diferencias significativas en función del tiempo ($p = 0,000$).

La prueba de Duncan (Tabla 22) muestra que la MO difiere significativamente en los tres tiempos del experimento, así: el contenido de MO es significativamente mayor en el tiempo 2 que en el tiempo 0 y esta a su vez significativamente mayor al tiempo 1. Sin embargo, dentro de la clasificación de suelos para nivel de MO, sus contenidos están dentro del rango medio comprendido entre 5 y 10 %

Tabla 23. Prueba de Duncan para la MO en función del tiempo

Tiempo		N	Subconjunto para alfa = .05		
			1	2	3
Duncan(a)	1,00	15	7,1780		
	,00	15		8,0607	
	2,00	15			8,6847
	Sig.		1,000	1,000	1,000

La prueba de Pearson muestra que existe diferencia positiva y significativa de MO con el tiempo (Coef. 0,301*), es decir, a medida que avanza el tiempo de la investigación, mayor es el porcentaje de la MO, por el contrario en función del tratamiento se observa que la correlación es negativa pero no significativa (Coef. -0,243), es decir, el porcentaje de MO no se afecta significativamente debido al tratamiento.

5.7 CORRELACIÓN DE LA AFA CON OTROS PARÁMETROS

En la tabla 24 se muestran los niveles de correlación de la AFA con los parámetros P en sus diferentes formas, pH y MO.

Tabla 24. Correlación de la AFA con otros parámetros

Parámetro	Variable de agrupación	Correlación	P Disponible	P Orgánico	P Total	pH	% MO
AFA	Tratamiento	Rho de Spearman	-,608(**)	-,478(**)	,811(**)	,370(*)	-0,14
		Sig. (bilateral)	0	0,001	0	0,012	0,358
		N	45	45	45	45	45
	Tiempo	Pearson	-,701(**)	-,372(*)	,701(**)	,436(**)	0,04
		Sig. (bilateral)	0	0,012	0	0,003	0,796
		N	45	45	45	45	45

** La correlación es significativa al nivel 0,01 (bilateral).

* La correlación es significante al nivel 0,05 (bilateral).

En la tabla 24, se muestra que la correlación existente entre la AFA y el P disponible es negativa y altamente significativa tanto para la variable tratamiento como para el tiempo, es decir, el incremento en los P disponible hace que la AFA disminuya significativamente. Similares resultados exponen Arzuaga *et al.*,(2005), ellos refieren que en suelos ricos en P inorgánico las fosfatasas prácticamente no actúan, también Guija y sus colaboradores (2007), exponen que el fosfato inorgánico presente o liberado durante la catálisis por la fosfatasa ácida, se comporta como un inhibidor de tipo competitivo ^[40].

Del mismo modo en la tabla 24 se puede observar que la correlación entre la AFA con el P orgánico y total, es negativa altamente significativa. Es decir, el incremento de la AFA hace que el contenido de P orgánico y total, disminuya significativamente. Similares resultados reportan Arzuaga y colaboradores (2005), ellos refieren que la mineralización bioquímica del fósforo es gobernada por la actividad enzimática de la fosfatasa ácida, además dicha hidrólisis catalítica de P inorgánico se da a partir de P orgánico; Trasar *et al.*,(2003) también reporta una relación negativa ente la AFA y el P orgánico ^[43] ^[58]; además de estos dos artículos en la literatura se reportan suficientes estudios que respaldan la correlación altamente significativa y negativa que existe entre estos parámetros ^[62] ^[63] ^[64] ^[65] ^[66] ^[67] ^[68] ^[69].

La correlación de la AFA con el pH en función de la fertilización es significativa y negativa respecto al tratamiento; no obstante es altamente significativa y negativa en función de tiempo. Este fenómeno es atribuible a que la fertilización con fuentes de fósforo no disminuye los valores de pH inmediatamente después de su aplicación; sino que el pH va disminuyendo a medida que la sal de fósforo

inorgánico se va dissociando en el anión fosfato y el respectivo catión, proceso en el cual se liberan protones al medio incrementando la acidez de la solución del suelo ^[33], la cual aumenta a medida que avanza el tiempo, y esta acidez es también la causa que disminuya significativamente la AFA debido que se altera el carácter iónico de los grupos amino y carboxilo en la superficie proteica.

En la tabla 24 se muestra que la correlación entre la AFA y la MO no es significativa; este fenómeno se puede atribuir a que los tratamientos no afectaron significativamente los % de MO. Esto indica que la MO no es indicador susceptible a corto ni mediano plazo ^[35]; es de ahí que radica la desventaja de este parámetro como indicador de la calidad de un suelo.

6. CONCLUSIONES

- El suelo analizado presenta una textura franco arenosa, es fuertemente ácido, acidez atribuible a la MO, ya que la acidez intercambiable es baja sin detectar aluminio de cambio, además presenta serias deficiencias en P disponible, Mn, Fe y Cu. El suelo presenta una CIC normal atribuible principalmente a la MO.

- La alta densidad aparente (1,29), refleja un alto grado de compactación, este fenómeno es atribuible al cambio de uso del suelo de alta montaña a suelos de pastoreo y a su sobrepastoreo; favoreciendo de esta manera el encharcamiento del terreno, y la consecuente erosión hídrica y lavado de los nutrientes del suelo.

- La tasa de humificación de la MOS $< 50\%$, y el índice $HR_1 > 1$, demuestra que la cantidad de MOH es baja frente a su alta calidad, a pesar que prevalece la cantidad de ácidos húmicos sobre los fúlvicos se evidencia un bajo desarrollo de este suelo pues el contenido de carbono de las huminas es alto en comparación de las demás sustancias húmicas.

- La baja cantidad de MOH (40,66) en el suelo evidencia que la absorción de la fosfatasa ácida sobre los ácidos húmicos y fúlvicos es baja, esto explica la alta AFA que registro el suelo testigo al inicio de la investigación.

- La actividad de la fosfatasa ácida disminuye significativamente con la fertilización fosfatada sin importar el tipo de fertilizante, atribuyendo este efecto a la disponibilidad de fósforo inorgánico y al efecto de inhibición competitiva que ejercen los fosfatos sobre la actividad de dicha enzima. Dicho cambio en la actividad enzimática convierte a la AFA en un indicador a corto plazo de los efectos de la fertilización.

- La fertilización con Triple 15 redujo la AFA entre un 31 y 43%, frente al suelo fertilizado con fosfato diácido de potasio que la redujo entre 8 y 33%. Esto evidencia que la fertilización cumple el objetivo de mejorar los niveles de fósforo disponible independientemente del fertilizante que se use; sin embargo el triple 15 disminuye más la capacidad natural del suelo para mineralizar fósforo orgánico.

- Desde el punto de vista químico no importa qué tipo de fertilizante se utilice para alcanzar el nivel de fósforo disponible requerido por las plantas. Pero desde el punto de vista ambiental es preferible utilizar fertilizantes fosfatados de composición simple o constituidos por P y K, ya que cuando están acompañados de fuentes de nitrógeno la nitrificación del amoníaco produce más acidez al suelo y el amoníaco que se desprende por la reacción propia de dichos fertilizantes contribuye a la acumulación de este gas efecto invernadero en la atmósfera y por tanto al incremento del calentamiento global.

- La fertilización, no afecta inmediatamente el pH de la solución del suelo; no obstante a medida que avanza el tiempo se detecta una correlación altamente significativa y negativa, atribuible a la reacción ácida que generan el Triple 15 y el fosfato diácido de potasio en el suelo. Dicha disminución del pH hace que las condiciones de la reacción del suelo no sean óptimas para actividad catalítica de la enzima fosfatasa ácida.

- Se encontró una correlación altamente significativa y negativa entre el fósforo orgánico con la actividad enzimática de la fosfatasa ácida, este fenómeno se atribuye a que el fósforo inorgánico que no proviene de la fertilización, proviene de la mineralización del fósforo orgánico.

- El aumento del fósforo orgánico es atribuible al mejoramiento de los niveles de fósforo disponible; debido a la fertilización, pues parte de este fósforo pudo pasar a formas orgánicas por inmovilización por parte de los microorganismos del suelo incentivando de esta manera su proliferación.

- Se encontró que la correlación entre la actividad enzimática de la fosfatasa ácida con la MO no es significativa; este fenómeno se puede atribuir a que los tratamientos no afectaron significativamente los % de MO. Esto nos indica que MO no es un indicador susceptible a corto plazo; convirtiéndose esto en una desventaja de este parámetro como indicador de la calidad de un suelo.

- Del estudio se concluye que la aplicación de fertilizantes afecta la calidad del suelo disminuyendo la actividad enzimática en sistemas altoandinos, cuyo cambio de uso de suelo a pastoreo, está afectando sus condiciones naturales y generando procesos de erosión. En conjunto con resultados de otras investigaciones tales como la evaluación del efecto del enclavamiento y de la materia orgánica sobre la AFA, secuestro de C entre otros,

enmarcadas dentro del proyecto “Modelamiento Climático, Patrones de cambio y sus efectos en Ecosistemas Agrícolas Altoandinos identificando medidas de Adaptación y mitigación (VRI 2458)”, se pretende a largo plazo, obtener un modelamiento empírico para la Estimación de la Vulnerabilidad de estos ecosistemas al cambio climático producido por dicha actividad. Estos resultados serán presentados en el próximo XV Congreso Colombiano de la Ciencia del Suelo.

7. BIBLIOGRAFÍA

1. LEON SICARD, T. E. Agricultura sostenible. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia. 2010. 1-9 p.
2. SÁNCHEZ V, J. Fertilidad del suelo y nutrición Mineral de plantas. FERTITEC S.A. 2007. 1-17 p.
3. FASSBENDER, H. W., BORNEMISZA, E. Química de Suelos con Énfasis en Suelos de América Latina. Costa Rica. 1987. 7, 11 y 121-124 p.
4. MALAGON, D., PULIDO, C. Suelos de Colombia, origen, evolución, clasificación. Instituto Geográfico Agustín Codazzi. 1995. 289-326 p.
5. C.R.C. El Cauca Biosostenible, Cartilla Ambiental de la C.R.C. programa de: Educación Ambiental Participación Comunitaria y Comunicaciones. Popayán. 2007. 12,13 p.
6. ACUÑA, O., PEÑA, W., SERRANO, E., POCASANGRE, L., ROSALES, F., DELGADO, E., TREJOS, J., SEGURA, Á. Importance of microorganisms for soils quality and health. XVII Reuniao Internacional da Associacao para a Cooperacao nas Pesquisas sobre Banana no Caribe e na América Tropical. Brasil. 2006. 222-233 p.
7. CERÓN RINCÓN, L., MELGAREJO MUÑOZ, L. M. Soil Enzymes: Health and Quality Indicators. Acta Biológica Colombiana, Vol. 10 No. 1. 2005. 5-16 p.
8. BAUTISTA CRUZ, A., ETCHEVERS BARRA, J., CASTILLO SÁNCHEZ, R. F., GUTIÉRREZ CASTORENA, C. La Calidad del Suelo y sus Indicadores. Asociación Española de de Ecología Terrestre, Revista Científica y Técnica de Ecología y Medio Ambiente; Volumen XIII, Numero 002. Alicante, España. 2004. 90-97 p.
9. ADRIAANSE. A. Environmental Policy Performance Indicators. A Study on the Development of Indicators for Environmental Policy in the Netherlands. monographs. Netherlands, 1993.

10. HÜNNEMEYER, A. J., CAMINO, R., MULLER, S. Análisis del desarrollo sostenible en Centroamérica: Indicadores para la agricultura y los recursos naturales. IICA/GTZ. San José, Costa Rica. 1997.
11. PAZ FERREIRO, J., Propiedades bioquímicas de suelos de prado de Galicia. Tesis doctoral. USC. Facultad de farmacia.
12. JENKINSON, D. S., LADD, J. N. Microbial biomass in soils: measurement and turnover. En: E. A. Paul & J. N. Ladd (eds.), Soil Biochemistry Vol. 5. Marcel Dekker, New York. 1981. 415-417 p.
13. PICCOLO, A. The Supramolecular Structure of Humic Substances. Soil Science. Volume 166 - Issue 11. 2001. 810-832 p.
14. COLOMBO, S. M., SANTOS, L. B., O, MASINI, J. C. Propriedades Acido-Base e de Complexação de Ácidos Húmico e Fúlvico isolados de Vermicomposto. Química Nova, v. 30. 2007. 1261-1266 p.
15. OSTERBERG, R., LINDOVIST, I.K. Particle Size of Humic Acid. Soil Science Society of America. Volume 57. 1993. 283-285 p.
16. STEVENSON, F. Cycles of Soil Carbon, Nitrogen, Phosphorus, Sulfur, Micronutrients. New York, USA: A Wiley-Interscience publication. 1985. 1-42p.
17. BREEMEN, N., BUURMAN, P. Soil Formation. Laboratory of Soil Science and Geology. Kluwer Academic Publishers, 2ªed. New York, Dordrecht. 2002. 95-100 p.
18. DATTARI. La importancia de la materia orgánica en el suelo. Revista electrónica Terralia. Revista Agrícola General. 2004. 13-22 p.
19. ÅGREN, G. I., BOSATTA, E. Isotope Discrimination during Decomposition of Organic Matter: A Theoretical Analysis. Soil Science Society of America. 1996. 60:1121-1126 p.
20. SAUGIER, B., PONTAILLER, J. Y. Carbon global cycle and its consequences on photosynthesis in the Bolivian Altiplano. Ecología en Bolivia, 2006 Vol. 41(3): 71-85 p.
21. MICHEL, R. Captura de carbono en los suelos para un mejor manejo de la tierra. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. Roma. 2002. 4-57p.

22. GARAVITO, F. Propiedades Químicas de los Suelos. Instituto Geográfico Agustín Codazzi. Bogotá. 1974. Vol 10. No 11.
23. TSAI, S. M., ROSSETTO, R. Transformações microbianas do fósforo. In Microbiologia do Solo. Sociedade Brasileira de Ciência do Solo. Campinas, Brasil. 1992. 231-242 p.
24. GIRALDO, E. Agroquímica: Un Estudio de los Nutrientes Esenciales en la Producción Agrícola. Universidad del Cauca. Popayán. 2002.
25. CIFUENTES RODAS, A., NÚÑEZ ESCOBAR, R., ESPINOSA HERNÁNDEZ, V., ALCÁNTAR GONZÁLEZ, G. Association Lupinus-Maize in Phosphate Nutrition in an Andosol. 2001. Terra Volume 11, Número 2. 141-154 p.
26. BOSCHETTI, G. N., QUINTERO C, E. Importancia del Fósforo Orgánico del Suelo en la Nutrición Fosfatada de los Cultivos. Biblioteca de fertilidad y fertilizantes en español.
27. MARTINEZ, L., POTOSÍ, S. Fraccionamiento de Fósforo y su Correlación con la Materia Orgánica y otras Propiedades de los suelos del Departamento del Cauca. Trabajo de grado (Químico). Universidad del Cauca. Popayán. 2005.
28. ŠARAPATKA B. Phosphatase activities (ACP, ALP) in agroecosystem soils. Department of Ecology and Crop Production Science Uppsala. Sueciae. Doctoral thesis. 2003. Universitatis Agriculturae Sueciae.
29. STEVENSON, F.J. Cycles of soil (carbon, nitrogen, phosphorus, sulfur, micronutrients). John Wiley and Sons, New York. 1986. 231 – 28 p.
30. HARRISON, A.F. Soils organic phosphorus. C.A.B. International United Kingdom. 1982. 257p.
31. BURNS, R.G. Enzyme activity in soil: Location and a possible role in microbial ecology. Soil Biology and Biochemistry Volume 14, Issue 5. 1982. 423-427 p.
32. LEYTEM, A. B., MIKKELSEN, R. L., GILLIAM, J. W. Sorption of Organic Phosphorus Compounds in Atlantic Coastal Plain Soils. Soil Science. 2002. Volume 167 - Issue 10. 652-658 p.

33. CLAVIJO, J., LORA, R., MALAVOLTA, E., ZAPATA, R., ESPINOSA, J., AMEZQUITA, E., LEON, A., GUERRERO, R., MUÑOZ, R., BURBANO, H., SÁNCHEZ, L., VILLAR, L., GARCIA, A. Fertilidad de suelos – Diagnostico y control. Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo. Santafé de Bogotá. 1994. 221-282 p.
34. ROJAS, C. 2006. Interpretación de la disponibilidad de fósforo en los suelos de Chile. Centro de investigación INIA La Platina. Pag 25-45
35. GARCÍA I. C. Las Enzimas del Suelo y su Importancia. La Columna Académica. Academia de Ciencias de la Región de Murcia 2003.
36. DICK, W.A., TABATABAI, M. A. 1993. Significance and potential uses of soil enzymes. Soil Microbial Ecology. Metting FB (ed). Marrel Dekker, New York, Pp. 95-127. 48-53 p.
37. BRAVO REALPE, I., GIRALDO R., Efrén. Manual de prácticas de química agrícola: análisis de suelos, última actualización. Departamento de Química, Universidad del Cauca. Popayán, 2003.
38. YOSHIOKA, I. C., SÁNCHEZ, M., BOLAÑOS, M. M. Actividad de Fosfatasas Ácida y Alcalina en Suelo Cultivado con Plátano en tres Sistemas de Manejo. Revista Acta Agronómica, Volumen 55, fascículo 2. Palmira. Colombia, 2006. 9-14 p.
39. BOYER. P. The enzymes. Academic Press. Volumen 4, 3 edición. Estados Unidos, 1971. 896 p.
40. GUIJA, E., SOBERÓN, M., HAAK MARES, H., Mecanismo de acción de las fosfatasas ácidas de bajo peso molecular. Anales de la Facultad de Medicina Universidad Nacional Mayor de San Marcos. Volumen 68, fascículo 4. Lima, Perú, 2007. 356-362 p.
41. GÁLVIZ, C. L., BURBANO, H., BONILLA CORREA, C. R. Acid Fostatase Activity in Soils Cropping with Potato and Pastures from the Catambuco. Revista Acta Agronómica, Volumen 56, fascículo 1. Pasto. Colombia, 2007. 13-16 p.
42. DICK, W. A., CHENG, L., WANG, P. Soil acid and alkaline phosphatase activity as pH adjustment indicators. Soil Biology & Biochemistry volume 32, Issue 13. 2000. 1915–1919 p.

43. TRASAR, C., GIL, F., LEIRÓS, C. Técnicas de análisis de parámetros bioquímicos en suelos: medida de actividades enzimáticas y biomasa microbiana. Ediciones Mundi Prensa, España. 2003. 370 p.
44. MARTINEZ, V., TABATABAI, M. A. Enzyme activities in a limed agricultural soil. *Biology and Fertility of Soils*. Volume 31, Number 1. 2000. 85–91 p.
45. MOSQUERA, C., BRAVO, I., HANSEN, E. Comportamiento estructural de los Ácidos Húmicos obtenidos de un suelo Andisol del departamento del Cauca. *Revista Colombiana de Química*. Volumen 36, número 1. 2007. 31-41 p.
46. TABATABAI, A M., WEAVER, R. W., ANGLE, S., BOTTOMLEY, P. *Methods of Soil Analysis. Part 2. Microbiological and Biochemical Properties*. 1994. 775-814 p.
47. ANTE, L. Fosfatasa Ácida como Indicador Biológico de Cambios a Corto Plazo por Efecto del Manejo Orgánico del Suelo. Departamento de Química, Universidad del Cauca. Popayán. Trabajo de grado para optar por el título de químico. 2010.
48. ARBOLEDA, C. Estimación del Efecto del Encalamiento sobre un Indicador Bioquímico de la Calidad del Suelo. Departamento de Química, Universidad del Cauca. Popayán. Trabajo de grado para optar por el título de químico. 2010.
49. BRAVO, I., MANRIQUEZ, L., POTOSÍ, S. Fraccionamiento del fósforo y correlación con la materia orgánica en dos suelos del departamento del Cauca. *Suelos Ecuatoriales*. Volumen 37, número 2. 2008. 147-154 p.
50. SILVA, F. Fundamentos para la interpretación de análisis de suelos, plantas y aguas para riego. *Sociedad Colombiana De La Ciencia Del Suelo*. Tercera edición. Santa fé de Bogotá. 2000.
51. BALLESTEROS, J., BERNAL, J., CORREA, A., CASTRILLON, W., Fraccionamiento de las sustancias húmicas de un Aciudoxit Melanudands Medial amórfico Isotérmico de Chinchina Caldas. *Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo. Suelos ecuatoriales*. Volumen 1, Número1. 2003. 19-23 p.

52. SENESI, N. Calidad de las sustancias húmicas presentes en los desechos orgánicos y sus efectos sobre las sustancias húmicas nativas del suelo. Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo. Suelos ecuatoriales. Volumen 32, número 2. 2002. 142-154 p.
53. SARDANS, J., PEÑUELAS, J., OGAYA, R. Experimental drought reduced acid and alkaline phosphatase activity and increased organic extractable P in soil in a *Quercus ilex* Mediterranean forest. *European Journal of Soil Biology*. 2008. 509-520 p.
54. KANG, H., FREEMAN, C. Phosphatase and arylsulphatase activities in wetland soils: annual variation and controlling factors. *Soil Biol. Biochem.* Volume 31. 1999. 449-454 p.
55. HALSTEAD, R.L. Phosphatase activity of soils as influenced by lime and other treatments. *Can. J. Soil Sci.* Volume 44: 1964. 137-144 p.
56. JUMA, N. G., TABATABAI, M. A. Distribution of phosphomonoesterases in soils. *Soil Science*. Volume 126. 1978. 101-108 p.
57. ACOSTA, Y., PAOLINI, J. Deshidrogenase enzyme activity in a Calciorthids soil amended with organic residues. 2005 *Agronomía Tropical* V 55 No Maracay ISSN002-192X sp
58. ARZUAGA, S. A., FERNÁNDEZ, C., DURLAZO, H., VAZQUEZ, S. Fósforo total, fósforo orgánico y fosfatasa ácida, en Entisoles, Alfisoles y Vertisoles de Corrientes con diferentes usos agrícolas. Universidad Nacional del Nordeste, Comunicaciones Científicas y Tecnológicas, 2005. Resumen A-066
59. CRUZ, F.G., FLORES, R.D., GONZÁLEZ, A.G., SANTOS, T.A. Acid Phosphatase, Nitrate Reductase, Glutamine Synthetase, and Phosphorus and Nitrogen Use Efficiency in Cereals [Terra latinoamericana (México, D.F.), México, 2005 V23 N4. 457-468 p.
60. GARCÍA, C. Técnicas de Análisis de Parámetros Bioquímicos en Suelos: Medidas de Actividades Enzimáticas y Biomasa Microbiana. Edición Española, Ediciones Mundi-Prensa. 2003. 51-77 p.
61. ŠARAPATKA, B. Tesis doctoral, Phosphatase activities (ACP, ALP) in agroecosystem soils. Department of Ecology and Crop Production Science Uppsala. 2003. 14-58 p.

62. BARROTI, G., NAHAS, E. El Fósforo y el Encalado sobre las Fosfatasas y la Producción de *Braquiaria Ruziziensis* y *Cajanus Cajan*. Universidad Estatal Paulista, Agronomía tropical 53 (2). 2001. 209-225 p
63. SANTRUCKOVA, H., VRBA, J., PICEK, T., KOPACEK, J. Soil biochemical activity and phosphorus transformations and losses from acidified forest soils. *Soil Biology & Biochemistry* 36. 2004. 1569–1576 p.
64. LUNG, S.C., LEUNG, A., KUANG, R., WANG, Y., LEUNG, P., LIM, B. L. Phytase activity in tobacco (*Nicotiana tabacum*) root exudates is exhibited by a purple acid phosphatase. *Phytochemistry* 69 .2008. 365–373 p.
65. TURNER, B. L., HAYGARTH, P. M. Phosphatase activity in temperate pasture soils: Potential regulation of labile organic phosphorus turnover by phosphodiesterase activity. *Science of the Total Environment* 344. 2005. 27– 36 p.
66. CARREIRA, J.A., GARCÍA, R., LIÉTOR, J., HARRISON, A.F. Changes in soil phosphatase activity and P transformation rates induced by application of N- and S-containing acid-mist to a forest canopy. *Soil Biology & Biochemistry* 32. 2000. 1857–1865 p.
67. YONG-FU, L., AN-CHENG, L., XING-HUAAND, W., XU-GUO, Y. Changes in Phosphorus Fractions, pH, and Phosphatase Activity in Rhizosphere of Two Rice Genotypes. *Soil Science Society of China*. Volume 18, Issue 6. 2008. 785-794 p.
68. GARG, S., BAHL, G. S. Phosphorus availability to maize as influenced by organic manures and fertilizer P associated phosphatase activity in soils. *Bioresource Technology*. Volume 99. 2008. 5773–5777 p.
69. CRIQUET, S., BRAUD, A. Effects of organic and mineral amendments on available P and phosphatase activities in a degraded Mediterranean soil under short-term incubation experiment. *Soil & Tillage Research*. Volume 98. 2008. 164–174 p.

ANEXOS

Anexo 1. Parámetros de comparación para niveles de fertilidad en suelos de clima medio (SCCS. 2000)

Tabla 1. Nivel de densidad real

Nivel	Bajo	Normal	Alto	Muy alto
Densidad (g/cm ³)	2.1 – 2.3	2.3 – 2.5	2.6 – 2.8	> 2.8

Tabla 2. Nivel de MO en suelo de clima frío

Nivel	Bajo	Medio	Alto
% MO	<5	5-10	>10

Tabla 3. Clasificación de acidez de suelos de acuerdo al valor de pH

pH	Clasificación
4.0 - 4.5	Acidez extrema
4.5 - 5.0	Acidez muy fuerte
5.0 - 5.5	Acidez fuerte
5.5 - 6.0	Acidez media
6.0 - 6.5	Acidez suave
6.5 - 7.0	Acidez muy suave
7.0 - 8.0	Alcalinidad suave
8.0 - 8.5	Alcalinidad moderada
8.5 - 9.0	Alcalinidad moderada
9.0 - 9.5	Alcalinidad fuerte
9.5 - 10.0	Alcalinidad muy fuerte

Tabla 4. Toxicidad de aluminio en el suelo (S.C.C.S. 2000)

Al Int. Meq/100g. suelo		Evaluación	Efectos tóxicos
< 1.5 meq		Bajo	No tóxico
1.6 a 3.0 meq		Medio	Mod. Tóxico
> 3.0 meq		Alto	Tóxico, especialmente en leguminosas
% Saturación de aluminio	>60 Reducción severa del crecimiento de plantas	30-60 Reduce moderadamente el crecimiento y desarrollo	<30 Generalmente no tóxica

Tabla 5. Clasificación del Suelo de acuerdo a niveles de Ca, Mg y K

Nutriente	(meq/100 g suelo)		
	Bajo	Medio	Alto
Ca	< 3.00	3.00 - 6.00	> 6.00
Mg	< 1.50	1.50 - 2.50	> 2.50
K	< 0.15	0.15 - 0.30	> 0.30

Tabla 6. Disponibilidad del fósforo para el método de Bray II

Nivel crítico	Disponibilidad
< 15 ppm	Bajo
15 – 30 ppm	Medio
> 30 ppm	Alto

Anexo 2. Tratamiento estadístico

Tabla 7 Prueba de normalidad para datos en función del tratamiento

Tratamiento		Shapiro-Wilk		
		Estadístico	Gl	Sig.
P Disponible	1,00	,864	15	,060
	2,00	,845	15	,015
	3,00	,810	15	,005
P Orgánico	1,00	,898	15	,088
	2,00	,734	15	,001
	3,00	,737	15	,001
P Total	1,00	,938	15	,358
	2,00	,957	15	,637
	3,00	,968	15	,824
AFA	1,00	,746	15	,001
	2,00	,797	15	,003
	3,00	,694	15	,000
pH	1,00	,908	15	,127
	2,00	,830	15	,009
	3,00	,717	15	,000
% MO	1,00	,901	15	,098
	2,00	,973	15	,899
	3,00	,892	15	,071

Tabla 8 Prueba de normalidad para datos en función del tiempo

Tiempo	Shapiro-Wilk			
	Estadístico	gl	Sig.	
P Disponible	,00	,712	15	,000
	1,00	,767	15	,000
	2,00	,851	15	,018
P Orgánico	,00	,933	15	,301
	1,00	,871	15	,034
	2,00	,906	15	,119
P Total	,00	,958	15	,662
	1,00	,972	15	,885
	2,00	,954	15	,593
AFA	,00	,956	15	,631
	1,00	,889	15	,066
	2,00	,848	15	,016
pH	,00	,664	15	,000
	1,00	,825	15	,008
	2,00	,868	15	,031
% MO	,00	,969	15	,844
	1,00	,938	15	,364
	2,00	,947	15	,486

Tabla 9. ANOVA de un factor en función del tratamiento

		Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
P Total	Inter-grupos	282150,119	2	141075,060	11,975	,000
	Intra-grupos	494790,606	42	11780,729		
	Total	776940,725	44			
% MO	Inter-grupos	1,932	2	,966	1,341	,272
	Intra-grupos	30,247	42	,720		
	Total	32,179	44			

Tabla 10. Prueba de Kruskal-Wallis con variable de agrupación tratamiento

	P Disponible	P Orgánico	AFA	pH
Chi-cuadrado	29,976	12,880	5,405	21,742
gl	2	2	2	2
Sig. Asintót.	,000	,002	,067	,000

Tabla 11. ANOVA de un factor en función del tiempo

		Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
P Orgánico	Inter-grupos	1002314,950	2	501157,475	21,707	,000
	Intra-grupos	969651,356	42	23086,937		
	Total	1971966,306	44			
P Total	Inter-grupos	361463,694	2	180731,847	18,270	,000
	Intra-grupos	415477,032	42	9892,310		
	Total	776940,725	44			
AFA	Inter-grupos	796,366	2	398,183	188,560	,000
	Intra-grupos	88,692	42	2,112		
	Total	885,058	44			
% MO	Inter-grupos	17,193	2	8,596	24,092	,000
	Intra-grupos	14,986	42	,357		
	Total	32,179	44			

Tabla 12. Prueba de Kruskal-Wallis con variable de agrupación tiempo

	P Disponible	pH
Chi-cuadrado	9,160	14,333
Gl	2	2
Sig. Asintót.	,010	,001

Tabla 13. Prueba Normalidad (AFA) para cada tratamiento en función de cada tiempo

TIEMPO 0	Tratamiento		Shapiro-Wilk		
			Estadístico	gl	Sig.
AFA	1		,989	5	,977
	2		,824	5	,126
	3		,922	5	,545
TIEMPO 1	Tratamiento		Shapiro-Wilk		
			Estadístico	gl	Sig.
AFA	1		,864	5	,244
	2		,897	5	,392
	3		,917	5	,512
TIEMPO 2	Tratamiento		Shapiro-Wilk		
			Estadístico	gl	Sig.
AFA	1		,943	5	,688
	2		,832	5	,145
	3		,864	5	,243

Tabla 14. ANOVA de un factor (AFA) para cada tratamiento en función de cada tiempo

TIEMPO 0	T1,T2,T3	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
	Inter-grupos	58,794	2	29,397	44,668	,000
Intra-grupos	7,897	12	,658			
Total	66,691	14				
TIEMPO 1	T1,T2,T3	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
	Inter-grupos	10,760	2	5,380	77,729	,000
Intra-grupos	,831	12	,069			
Total	11,591	14				
TIEMPO 2	T1,T2,T3	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
	Inter-grupos	9,637	2	4,818	70,530	,000
Intra-grupos	,820	12	,068			
Total	10,457	14				

Tabla 15. Prueba Normalidad (Humedad) para cada tratamiento en función de cada tiempo

TIEMPO 0	Tratamiento		Shapiro-Wilk		
			Estadístico	gl	Sig.
Humedad	1		,896	5	,387
	2		,927	5	,578
	3		,668	5	,004
TIEMPO 1	Tratamiento		Shapiro-Wilk		
	Estadístico	gl	Sig.		
Humedad	1		,967	5	,854
	2		,985	5	,959
	3		,820	5	,118
TIEMPO 2	Tratamiento		Shapiro-Wilk		
	Estadístico	gl	Sig.		
Humedad	1		,972	5	,887
	2		,852	5	,202
	3		,818	5	,112

Tabla 16. ANOVA de un factor (Humedad) para cada tratamiento en función de cada tiempo

TIEMPO 0	T1, T2, T3	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
	Inter-grupos	22,345	2	11,172	1,428	,278
	Intra-grupos	93,860	12	7,822		
	Total	116,205	14			
TIEMPO 1	T1, T2, T3	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
	Inter-grupos	47,392	2	23,696	5,398	,021
	Intra-grupos	52,682	12	4,390		
	Total	100,075	14			
TIEMPO 2	T1, T2, T3	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
	Inter-grupos	84,206	2	42,103	4,735	,030
	Intra-grupos	106,709	12	8,892		
	Total	190,915	14			

Tabla 17. Correlaciones paramétricas en función del tratamiento.

		Tratamiento	P Disponible	P Orgánico	P Total	AFA	pH	% MO
P Total	Correlación de Pearson	,596(**)	,742(**)	,687(**)	1	-,701(**)	-,511(**)	,059
	Sig. (bilateral)	,000	,000	,000	.	,000	,000	,699
	N	45	45	45	45	45	45	45
% MO	Correlación de Pearson	-,243	-,179	,485(**)	,059	,040	-,370(*)	1
	Sig. (bilateral)	,108	,238	,001	,699	,796	,012	.
	N	45	45	45	45	45	45	45

** La correlación es significativa al nivel 0,01 (bilateral).

* La correlación es significativa al nivel 0,05 (bilateral).

Tabla 18. Correlaciones no paramétricas en función del tratamiento

			Tratamiento	P Disponible	P Orgánico	P Total	AFA	pH	% MO
Rho de Spearman	P Disponible	Coefficiente de correlación	,767(**)	1,000	,401(**)	,763(**)	-,608(**)	-,479(**)	-,090
		Sig. (bilateral)	,000	.	,006	,000	,000	,001	,555
		N	45	45	45	45	45	45	45
	P Orgánico	Coefficiente de correlación	,513(**)	,401(**)	1,000	,616(**)	-,478(**)	-,296(*)	,408(**)
		Sig. (bilateral)	,000	,006	.	,000	,001	,048	,005
		N	45	45	45	45	45	45	45
	AFA	Coefficiente de correlación	-,339(*)	-,608(**)	-,478(**)	-,811(**)	1,000	,370(*)	-,140
		Sig. (bilateral)	,023	,000	,001	,000	.	,012	,358
		N	45	45	45	45	45	45	45
	pH	Coefficiente de correlación	-,050	-,479(**)	-,296(*)	-,428(**)	,370(*)	1,000	-,374(*)
		Sig. (bilateral)	,743	,001	,048	,003	,012	.	,011
		N	45	45	45	45	45	45	45

** La correlación es significativa al nivel 0,01 (bilateral).

* La correlación es significativa al nivel 0,05 (bilateral).

Tabla 19. Correlaciones paramétricas en función del tiempo

		Tiempo	P Disponible	P Orgánico	P Total	AFA	pH	% MO
P Orgánico	Correlación de Pearson	,567(**)	,549(**)	1	,687(**)	-,372(*)	-,522(**)	,485(**)
	Sig. (bilateral)	,000	,000	.	,000	,012	,000	,001
	N	45	45	45	45	45	45	45
P Total	Correlación de Pearson	,680(**)	,742(**)	,687(**)	1	-,701(**)	-,511(**)	,059
	Sig. (bilateral)	,000	,000	,000	.	,000	,000	,699
	N	45	45	45	45	45	45	45
AFA	Correlación de Pearson	-,879(**)	-,701(**)	-,372(*)	-,701(**)	1	,436(**)	,040
	Sig. (bilateral)	,000	,000	,012	,000	.	,003	,796
	N	45	45	45	45	45	45	45
% MO	Correlación de Pearson	,301(*)	-,179	,485(**)	,059	,040	-,370(*)	1
	Sig. (bilateral)	,044	,238	,001	,699	,796	,012	.
	N	45	45	45	45	45	45	45

** La correlación es significativa al nivel 0,01 (bilateral).

* La correlación es significante al nivel 0,05 (bilateral).

Tabla 20. Correlaciones no paramétricas en función del tiempo.

			Tiempo	P Disponible	P Orgánico	P Total	AFA	pH	% MO
Rho de Spearman	P Disponible	Coefficiente de correlación	,405(**)	1,000	,401(**)	,763(**)	-,608(**)	-,479(**)	-,090
		Sig. (bilateral)	,006	.	,006	,000	,000	,001	,555
		N	44	45	45	45	45	45	45
	pH	Coefficiente de correlación	-,404(**)	-,479(**)	-,296(*)	-,428(**)	,370(*)	1,000	-,374(*)
		Sig. (bilateral)	,006	,001	,048	,003	,012	.	,011
		N	44	45	45	45	45	45	45

** La correlación es significativa al nivel 0,01 (bilateral).

* La correlación es significativa al nivel 0,05 (bilateral).

Anexo 3. Valores de la actividad de la fosfomonoesterasa (García, 2003)

Tabla 21. Valores de la actividad de la fosfomonoesterasa obtenidos a partir de datos bibliográficos, en los que la determinación de la AFA se realiza con el método descrito.

Suelo	Rango de actividad (μ moles p-NF/g h)	Referencia
Horizonte A de suelos de pradera	3,8 – 8,4	Speir, 1977
	1,2 – 9,1	Spiers y McGill, 1979
Horizonte A de suelos de turberas	5,0	Mathur y Levesque, 1980
Horizontes A suelos mediterráneos	22,5	Nannipien <i>et al.</i> , 1980
Horizontes A de suelos árticos	11,8 – 31,3	Neal, 1982
Horizontes superficiales de suelos forestales, pradera y cultivados	4,3- 6,1	de Prado <i>et al.</i> , 1982
Horizontes superficiales de suelos forestales	0,3 – 19,1	Harrison, 1983
Horizonte A ₁ de suelos sin cultivar	0,2 – 2,0	Frankenberger y Dick, 1983
Horizontes superficiales de suelos de pradera	0,7 – 7,8	Speir <i>et al.</i> , 1984
Horizontes superficiales de suelos de prado	5,4 – 32,8	Saratchandra <i>et al.</i> , 1984
Horizontes superficiales de suelos de cultivo	0,9 – 2,1	Bolton <i>et al.</i> , 1985
Fórnas de suelos forestales	14,4 – 20,1	Pang y Kolenko, 1986
Horizontes Ah de suelos forestales	1,4 – 7,2	Pang y Kolenko, 1986
Horizontes Ah de suelos forestales y de pradera	0,8 – 15,6	Baligar <i>et al.</i> , 1988
Horizontes Ah de suelos forestales	0,3 – 0,6	Rastin <i>et al.</i> , 1988
Fórna de un suelo forestal	3,5	Haüsslin y Marschner, 1989
Horizonte Ah de un suelo forestal	1,7	Haüsslin y Marschner, 1989
Horizontes Ah de suelos forestales	0,4 – 0,8	Rastin <i>et al.</i> , 1990 a,b
Horizontes Ah de suelos forestales	9,6 – 38,1	Badalucco <i>et al.</i> , 1992
Horizontes Ah de suelos forestales	3,6 – 18,1	Fox y Comerford, 1992
Suelos sin vegetación zona árida	0,1 – 0,9	García <i>et al.</i> , 1994
Suelos forestales zona árida	1,3	Pascual <i>et al.</i> , 2000
Fórnas de suelos de robledal	9,2 – 47,5	Trasar-Cepeda <i>et al.</i> , 2000a
Horizontes Ah de suelos de robledal	2,2 – 15,8	Trasar-Cepeda <i>et al.</i> , 2000a
Horizontes superficiales de suelos de pradera	2,2 – 5,8	Trasar-Cepeda <i>et al.</i> , 2000b