

**MEDICIÓN DE LA VARIABILIDAD EN PROPIEDADES FÍSICAS QUÍMICAS Y
EL GRADO DE MINERALIZACIÓN DE LA MATERIA ORGÁNICA DE SUELOS
ALTOANDINOS DE LA MICROCUENCA SANTA TERESA AFECTADOS POR
EL CAMBIO DEL USO**

**KATERIN LISSETH MUÑOZ VASQUEZ
GISEL STHEPFANY SERNA MONTENEGRO**

**UNIVERSIDAD DEL CAUCA
FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES EXACTAS Y DE LA EDUCACIÓN
DEPARTAMENTO DE QUÍMICA
POPAYÁN
2013**

**MEDICIÓN DE LA VARIABILIDAD EN PROPIEDADES FÍSICAS QUÍMICAS Y
EL GRADO DE MINERALIZACIÓN DE LA MATERIA ORGÁNICA DE SUELOS
ALTOANDINOS DE LA MICROCUENCA SANTA TERESA AFECTADOS POR
EL CAMBIO DEL USO**

Trabajo de grado, presentado como requisito parcial para optar al título de química

**KATERIN LISSETH MUÑOZ VASQUEZ
GISEL STHEPFANY SERNA MONTENEGRO**

PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

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
2013**

Nota de Aceptación

**Directora: Isabel Bravo Realpe
M.Sc**

**Jurado: Juan Carlos Argoti
Ph**

**Jurado: Iván Enrique Paz
M.Sc**

Fecha de sustentación: Popayán, día 5 de agosto de 2013

DEDICATORIA

Con toda la humildad de nuestro corazón dedicamos el presente trabajo en a Dios quien ha sido nuestra guía a través de nuestras vidas.

Él con su infinito amor ha permitido que la sabiduría dirija y guíe nuestros pasos, ha iluminado nuestro sendero cuando más oscuro ha estado, a puesto grandes personas en nuestro camino y nos ha dado la fortaleza necesaria para culminar esta etapa de nuestras vidas, tras superar todos los obstáculos que se presentaron.

A nuestros padres pilar de nuestras vidas, con su apoyo incondicional, enseñanzas y amor, creyeron y confiaron en nosotros sin dudar nunca de nuestras capacidades.

A toda nuestra familia que siempre nos apoyó, acompañó en cada momento de nuestro crecimiento y espero con anhelo la culminación de este ciclo más en nuestras vidas.

AGRADECIMIENTOS

A Dios por ser nuestra guía y mostrarnos la luz que nos brinda la fortaleza para avanzar en estos años de nuestras vidas.

A nuestros padres Delcy Vasquez y Oswald Muñoz, Ana Luby Montenegro y Guido Serna (QEPD), por su inmenso amor, comprensión y por enseñarnos además a luchar en esta vida llena de adversidades, a conquistar las metas que nos proponemos hasta agotar los recursos que sean necesarios, a estar a nuestro lado cuando hemos caído y motivarnos a seguir adelante, por brindarnos su confianza y sus consejos que sirvieron de ayuda para comprender y entender mejor las cosas, por brindarnos la fortaleza y el estímulo necesario para la culminación de este Trabajo.

A nuestros hermanos, por su cariño incondicional, compañía, amistad y consejos que hicieron de nosotras mejores personas.

A nuestros Familiares quienes nos han entregado su amor, sus consejos y apoyo siempre.

A nuestros amigos: Paola, Angelica, Fernando, Miguel, Cesar, Julian, Jhonatan por ser pacientes, por ayudarnos a seguir adelante y brindarnos su apoyo, además de compartir las angustias y gratificaciones durante estos años de estudio; por todos esos momentos de alegrías, locuras y penas vividas juntos, gracias por su amistad.

A nuestra directora de trabajo de grado, M.Sc. Isabel Bravo Realpe por su paciencia, apoyo, sus consejos, dirección, entrega y por su amistad.

A cada uno de nuestros profesores que ayudaron en nuestra formación tanto académica como personal.

A nuestros compañeros del grupo de Agroquímica, por su amistad quienes de alguna manera nos brindaron su colaboración en el grupo, muchas gracias.

A nuestros compañeros de carrera por la amistad que nos brindaron.

A todas las personas que creyeron en nosotras...

TABLA DE 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 Y ESTADO DEL ARTE.	19
3.1 MICROCUENCA.....	19
3.2 EL CONCEPTO DE SUELO	19
3.2.1 Suelos altoandinos	20
3.3 FERTILIDAD DEL SUELO	21
3.3.1 Propiedades que determinan la fertilidad del suelo.....	21
3.3.1.1 Físicas.....	22
3.3.1.2 Químicas.....	23
3.3.1.3 Biológicas.....	25
3.4 CARBONO ORGÁNICO DEL SUELO	25
3.4.1 Calentamiento global y captura de carbono.....	26
3.5 MATERIA ORGÁNICA EN EL SUELO	27
3.5.1 Clasificación de las sustancias húmicas.	29

3.5.1.1	Ácidos fúlvicos	29
3.5.1.2	Ácidos húmicos.....	29
3.5.1.3	Huminas.....	30
3.5.2	Importancia de la Materia Orgánica en el Suelo	30
3.6	NITRÓGENO EN EL SUELO.....	30
3.7	ALÓFANOS	32
3.8	PAPEL DE LA HOJARASCA EN EL SUELO.....	33
3.9	GRADO DE MINERALIZACIÓN Y HUMIFICACIÓN DE LOS SUELOS	34
4.	METODOLOGÍA.....	36
4.1	FASE DE CAMPO	36
4.1.1	Localización de la zona de estudio	36
4.1.2	Diseño experimental de muestreo de los suelos.....	36
4.2	FASE DE LABORATORIO.....	39
4.2.1	Caracterización física y química.....	39
4.2.3	Evaluación cualitativa de la presencia de alófanos en las muestras compuestas.....	45
4.2.4	Caracterización de hojarasca proveniente de los suelos de bosque.....	45
4.2.4.1	Evaluación de la tasa de mineralización de la hojarasca	45
4.2.5	Fraccionamiento de la materia orgánica	45
4.2.5.1	Método Granulométrico.....	45
4.2.5.3	Evaluación del grado de mineralización de la MOS	46
4.2.5.4	Evaluación del grado de Humificación de la MOS	47
4.3	ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LOS RESULTADOS.....	47

5. RESULTADOS	48
5.1 CARACTERIZACIÓN DE LOS SUELOS CON DIFERENTE USO	48
5.1.1 Influencia del cambio de uso de suelo en las propiedades físicas y químicas de suelos	56
5.2 CARACTERIZACIÓN FÍSICA Y QUÍMICA DE MUESTRAS COMPUESTAS	68
5.3 EVALUACIÓN CUALITATIVA DE LA PRESENCIA DE ALÓFANOS EN LAS MUESTRAS COMPUESTAS	82
5.4 CARACTERIZACIÓN DE HOJARASCA PROVENIENTE DE LOS SUELOS DE BOSQUE.....	84
5.5. EVALUACIÓN DEL GRADO DE MINERALIZACIÓN Y HUMIFICACIÓN DE LOS SUELOS	88
5.5.1 Efecto del cambio de uso de suelo sobre el grado de mineralización ...	88
5.5.2 Efecto del cambio de uso de suelo sobre el grado de humificación de la MOS	90
CONCLUSIONES	92
REFERENCIAS	94
ANEXOS.....	101
ANEXO A. Parámetros de comparación para niveles de fertilidad en suelos de clima medio para suelos de Colombia (SCCS. 2000)	101
ANEXO B. Resultados estadísticos para los análisis de las 165 muestras..	103
ANEXO C. Resultados estadísticos para los análisis de las muestras compuestas.....	106
ANEXO D. Resultados estadísticos para los análisis de las muestras de hojarasca.....	117

LISTA DE ACRÓNIMOS

- Ac Int:** Acidez intercambiable
- AF:** Ácidos fúlvicos
- AH:** Ácidos húmicos
- Al Int:** Aluminio intercambiable
- Ar-Fr:** Arenosa-Franco
- C/N:** Relación Carbono/Nitrógeno
- Ca/Mg:** Relación Calcio/Magnesio
- Ca+Mg/K:** Relación Calcio+Magnesio/Potasio
- CIC:** Capacidad de intercambio catiónico
- CICE:** Capacidad de intercambio catiónico efectiva
- CO:** Carbono orgánico
- COS:** Carbono orgánico del suelo
- Da:** Densidad aparente
- FAO:** Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura
- Fr-Ar:** Franco-Arenosa
- HH:** Humedad higroscópica
- IPCC:** Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático
- MO:** Materia orgánica
- MOS:** Materia orgánica del suelo
- MOF:** Materia orgánica fresca
- MOH:** Materia orgánica humificada
- MOH/MOF:** Relación materia orgánica humificada/Materia orgánica fresca
- P Disp:** Fósforo disponible
- RH:** Relación de humificación
- SAI:** Saturación de aluminio
- SAIE:** Saturación de aluminio efectiva
- SB:** Saturación de bases
- SBE:** Saturación de bases efectiva

SCa: Saturación de calcio
SCaE: Saturación de calcio efectiva
SH: Sustancias húmica
SK: Saturación de potasio
SKE: Saturación de potasio efectiva
SMg: Saturación de magnesio
SMgE: Saturación de magnesio efectiva
SNa: Saturación de sodio
SNaE: Saturación de sodio efectiva
SSSA: Sociedad de la Ciencia del Suelo de América

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Propiedades físicas y su relación con la fertilidad del suelo	22
Tabla 2. Propiedades químicas y su relación con la fertilidad del suelo	24
Tabla 3. Número de unidades de muestreo a analizar	37
Tabla 4. Formulas químicas de los análisis de las muestras	44
Tabla 5. Formulas para el cálculo de los índices de humificación	47
Tabla 6. Resultados de la caracterización de las muestras de bosque	49
Tabla 7. Resultados de la caracterización de las muestras de bosque I	50
Tabla 8. Resultados de la caracterización de las muestras de bosque II	51
Tabla 9. Resultados de la caracterización de las muestras de pastura I	52
Tabla 10. Resultados de la caracterización de las muestras de pastura II	53
Tabla 11. Resultados de la caracterización de las muestras de pastura III	54
Tabla 12. Resultados de la caracterización de las muestras de cultivo	55
Tabla 13. Prueba de Kruskal-Wallis para las propiedades físicas y químicas de las muestras de suelo con diferente uso (Estadísticos de contraste ^{a,b})	56
Tabla 14. Comparación de promedios de las propiedades físicas y químicas de las muestras de suelos con diferente uso (Prueba de U Man Whitney)	57
Tabla 15. Correlaciones de Rho Spearman para las propiedades físicas y químicas de las muestras con diferente uso	67
Tabla 16. Resultados de la caracterización de las muestras compuestas	69
Tabla 17. Comparación de promedios de las propiedades físicas y químicas de las muestras compuestas de suelos con diferente uso (Prueba de Tukey)	71
Tabla 18. Correlaciones de Pearson para las muestras compuestas	81

Tabla 19.	Resultados de pH del suelo prueba cualitativa de presencia de alófanos	82
Tabla 20.	Resultados de la caracterización de la hojarasca de bosques	84
Tabla 21.	Comparación de algunas de las propiedades físicas y químicas de las hojarasca de los bosques (Prueba de Tukey)	86
Tabla 22.	Correlaciones de Pearson entre la hojarasca de bosques y el suelo de bosque	87
Tabla 23.	Comparación de los promedios de la relación C/N de las muestras y de las muestras compuestas	88
Tabla 24.	Composición porcentual de las fracciones y el grado de humificación de la MOS	90

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Fases que integran el suelo	20
Figura 2. Moléculas de ADN y ARN	23
Figura 3. Ciclo del carbono	26
Figura 4. Ciclo del nitrógeno	31
Figura 5. Etapas de descomposición de la hojarasca	33
Figura 6. Ubicación de la zona de estudio en el mapa del Cauca	36
Figura 7. Sitios de muestreo en la microcuenca Santa Teresa	38
Figura 8. Diagrama de separación granulométrica de la MO	46
Figura 9. Promedios de la humedad higroscópica y densidad aparente en las muestras	57
Figura 10. Promedios del % de partículas presentes en las muestras	59
Figura 11. Promedios de pH y P disponible en las muestras	60
Figura 12. Origen de acidez en el coloide húmico	60
Figura 13. Reacciones de precipitación de fosfatos	61
Figura 14. Estructura del hexafosfato de inositol	61
Figura 15. Relación entre la concentración relativa de iones fosfato y el pH	62
Figura 16. Adsorción de fósforo en minerales de arcilla 1:1	62
Figura 17. Promedios de los % CO y MO en las muestras	63
Figura 18. Promedios de los % N Total en las muestras	64
Figura 19. Transformación de N orgánico a formas inorgánicas	65
Figura 20. Promedios del % de partículas presentes en las muestras compuestas	72
Figura 21. Disponibilidad de nutrientes de acuerdo al pH	73
Figura 22. Promedios de pH en las muestras compuestas	73

Figura 23.	Promedios de los % CO y MO en las muestras compuestas	73
Figura 24.	Promedios del % N Total en las muestras compuestas	74
Figura 25.	Reacción de etapas de nitrificación	75
Figura 26.	Promedios de la acidez y el aluminio intercambiable en las muestras compuestas	75
Figura 27.	Complejación de la MO con el Al	76
Figura 28.	Reacción de intercambio e hidrólisis	76
Figura 29.	Reacción de las cargas del Al con los coloides	77
Figura 30.	Promedios de la CIC y CICE en las muestras compuestas	78
Figura 31.	Promedios de las bases de cambio en las muestras compuestas	79
Figura 32.	Promedios del % saturación de bases en las muestras compuestas	80
Figura 33.	Representación esquemática de la adsorción por alófanos	83
Figura 34.	Representación esquemática de la fijación de fósforo en los complejos humus-Al	83
Figura 35.	Promedios de la relación C/N en las muestras	88
Figura 36.	Reacción de fijación simbiótica del N	89
Figura 37.	Promedios de la relación C/N en las muestras compuestas	90

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
ANEXO A. Parámetros de comparación para niveles de fertilidad en suelos de clima medio para suelos de Colombia (SCCS. 2000)	101
ANEXO B. Resultados estadísticos para los análisis de las 165 muestras	103
ANEXO C. Resultados estadísticos para los análisis de las muestras compuestas	106
ANEXO D. Resultados estadísticos para los análisis de las muestras de hojarasca	117

RESUMEN

Se evaluó el efecto del cambio de uso de suelo de bosque primario a tierras de cultivo y pastoreo sobre las propiedades físicas y químicas, presencia de alófanos, grado de mineralización y calidad de la materia orgánica (MO) en suelos Altoandinos de la microcuenca Santa Teresa subcuenca río Las Piedras, municipio de Totoró, considerando la importancia de estas propiedades como indicativo de la fertilidad y composición química del suelo.

Se efectuó el muestreo de suelos bajo un diseño experimental aleatorio estratificado que permitió tener representación del área muestreada, con tres unidades de muestreo para bosque y pasturas, una unidad de muestreo para cultivo. Se tomaron 25 muestras en cada parcela teniendo en cuenta su posición geográfica de acuerdo a la georeferenciación. Las propiedades físicas evaluadas fueron: humedad higroscópica (HH), densidad aparente (Da) y textura. Las propiedades químicas fueron: pH, carbono orgánico (CO), capacidad de intercambio catiónico (CIC), determinación de nitrógeno total (%N), acidez intercambiable, aluminio intercambiable, fósforo disponible, bases de cambio y porcentajes de saturación. La calidad de la MO se determinó mediante la relación entre la MOH/MOF y la relación de humificación (RH). Se evaluó el aporte de la hojarasca al proceso de mineralización de la materia orgánica del suelo (MOS) en bosques.

En los suelos Altoandinos de bosque, pastura y cultivo se resalta: baja densidad aparente, textura Franco–Arenosa, bajo contenido de arcilla y alto en arenas, fuerte acidez, pérdida de nutrientes del suelo por procesos de lixiviación o erosión; también se evidencian altos niveles de CO, N y CIC. El cambio de uso de suelo de bosque a cultivo disminuye la acidez, Al intercambiable, incrementando significativamente el valor de pH, la CIC, disponibilidad de P, bases de cambio y su saturación, así como la calidad de la MO. Mientras que el cambio de uso a pasturas incrementa significativamente el valor de pH, Ca, Mg, saturación de bases, CIC efectiva, densidad aparente, disminuye la acidez, Al intercambiable, CIC, contenido de C con pérdida del horizonte A y cambios en la calidad de la MOS. La presencia de alófanos y el alto contenido de CO en todos los usos de suelo, demuestra la formación de complejos humus–Al, fuertes retenedores del P reduciendo su disponibilidad y generando fuerte acidez. Los suelos analizados presentan baja fertilidad, siendo necesario optimizar las condiciones para una mejor transformación de la MO en sustancias húmicas estables y aumentar su nivel productivo en forma sostenible.

Para la interpretación de los resultados, se aplicó un tratamiento estadístico mediante la utilización del Programa SPSS. Versión 11.5.

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La actividad biológica de los suelos altoandinos ubicados en alturas comprendidas entre 2800–3200 msnm dedicados a bosques primarios, es muy diferente a la de suelos de pastoreo o cultivo. En los bosques existe una acumulación gradual de residuos vegetales que a su vez le confieren al suelo características físicas y químicas específicas, entre las que se destacan su baja densidad aparente, alta capacidad de retención de agua, alto contenido de materia orgánica (MO) y alta relación C/N que sugiere una baja tasa de mineralización, pero con tasas de humificación más altas debido a la lenta pero efectiva transformación de su MO.

Suelos altoandinos de este tipo se encuentran en el departamento del Cauca, en la microcuenca Santa Teresa de la subcuenca del río Las Piedras, considerada fuente de regulación hídrica que alimenta a la Cuenca del Río Cauca, cumple funciones específicas como la regulación del flujo hídrico que desciende de los páramos y es de gran importancia para el ciclo global del carbono, ubicada entre los municipios de Popayán y Totoró. Esta subcuenca presenta un proceso de erosión natural, geológicamente propiciado por las formas escarpadas del relieve, la falta de fertilidad en los suelos con aumento de la densidad poblacional ha traído como consecuencia una mayor demanda alimenticia con una presión constante en la producción de cultivos y utilización de las tierras de bosques en el pastoreo de animales. Para satisfacer la creciente necesidad alimenticia se elevan los niveles de producción y productividad mediante el uso intenso de las tierras y utilización de agroquímicos, causando un lento y progresivo deterioro ambiental, alterando las propiedades físicas, químicas y biológicas de los suelos, afectando la biodiversidad y produciendo cambios en la reacción química de estos. La deforestación se ha convertido en uno de los principales promotores de la alteración de los ciclos del carbono y el nitrógeno, y por ende de las altas concentraciones de gases efecto invernadero.

No se conocen las propiedades físicas ni químicas de estos suelos, ni su estado de fertilidad, sin embargo la aplicación de fertilizantes fosfatados, enmiendas para corrección de acidez, abonos orgánicos y algunos plaguicidas es inminente, lo que da como resultado un cambio del hábitat natural y por ende de todas las propiedades de estos suelos. Para contribuir a la problemática es necesario conocer inicialmente el estado de los suelos tanto de bosque como de aquellos que han sido cambiados a cultivo de papa y a tierras de pastoreo.

HIPÓTESIS DE TRABAJO: El cambio de uso de suelo de bosque primario a tierras de pastoreo y cultivo de papa en suelos altoandinos de la microcuenca Santa Teresa, altera sus propiedades físicas, químicas y la tasa de mineralización de la MO.

2. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GENERAL

Valorar el efecto del cambio de uso de suelo sobre algunas propiedades físicas, químicas y la tasa de mineralización de la materia orgánica de suelos altoandinos de la microcuenca Santa Teresa, municipio de Totoró departamento del Cauca.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- 2.2.1** Caracterizar física y químicamente suelos altoandinos provenientes de la microcuenca Santa Teresa, con sistemas de bosques primarios, suelos cambiados a pasturas y cultivo de papa.
- 2.2.2** Evaluar la presencia de alófanos con el propósito de complementar la caracterización química de los suelos.
- 2.2.3** Determinar el contenido de C y N en la hojarasca proveniente de los suelos de bosque para evaluar su contribución en la mineralización de la materia orgánica de estos suelos.
- 2.2.4** Evaluar la tasa de mineralización de la materia orgánica mediante la determinación de la relación C/N y la relación de humificación en los suelos de los tres usos.

3. FUNDAMENTO TEÓRICO Y ESTADO DEL ARTE.

3.1 MICROCUENCA

Las microcuencas son unidades geográficas que se apoyan principalmente en el concepto hidrológico de división del suelo, es un territorio delimitado por la línea divisoria de las aguas conformadas por un sistema hídrico que las conduce a un medio acuático principal (un río principal, un río muy grande, un lago o un mar). Este es un ámbito tridimensional que integra las interacciones entre la cobertura sobre el terreno, las profundidades del suelo y el entorno de la línea divisoria de las aguas.^[1]

La microcuenca es el espacio donde se desarrollan las interacciones entre el uso de los recursos naturales y su manejo (acción antrópica) además del comportamiento de estos recursos (acción del ambiente). Los procesos asociados al recurso agua tales como escorrentía, calidad, erosión hídrica, producción de sedimentos, etc., normalmente se analizan sobre estas unidades geográficas.^[2, 3]

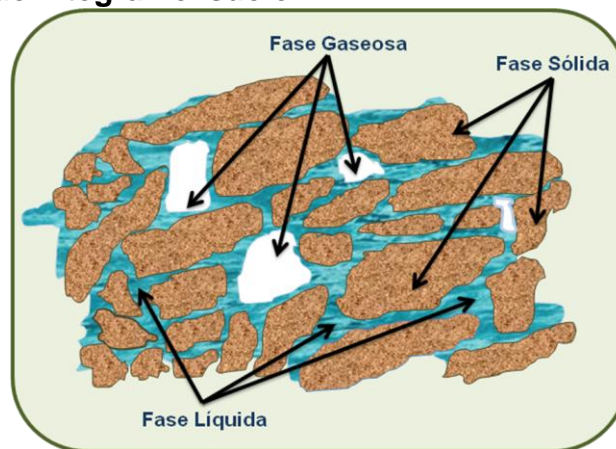
Una de las principales reservas de la red hidrográfica de Colombia es la microcuenca Santa Teresa perteneciente a la subcuenca del río Las Piedras, cuyo ecosistema está integrado así: 23,26 % se encuentra en pastos naturales y rastrojo bajo, el 3,82 % corresponde a vegetación natural y páramo, y el 0,42 % en cobertura de bosque natural; ubicada entre los municipios de Popayán y Totoró al nororiente de la ciudad, sobre el flanco occidental de la cordillera central. Hace parte de la cuenca del río Cauca en el departamento del Cauca y es considerado un reservorio estratégico, conformado por 13 microcuencas, humedales y manantiales cuya regulación hídrica tiene influencia sobre la única zona de páramo del municipio de Popayán; predominando las formas de montaña de escarpado relieve, donde actúan procesos de erosión natural.^[4, 5]

3.2 EL CONCEPTO DE SUELO

El suelo es la parte externa de la corteza terrestre, que ha sufrido y sigue resistiendo acciones causadas por agentes atmosféricos y seres vivos, sirve de soporte a la vegetación, es un sistema natural que consta de una o más sustancias y de una mezcla de interacciones entre sus tres fases (Figura 1): La fase sólida se considera mineral u orgánica, la primera está constituida por partículas de distintos tamaños, formas y composición química; mientras que la segunda está conformada por residuos vegetales en diferentes grados de descomposición y organismos vivos. La fase líquida, está constituida por el agua en el suelo con sustancias en solución ocupando una parte o la totalidad de los poros entre partículas sólidas. La fase gaseosa, corresponde al vapor o aire que

ocupa aquel espacio entre poros no ocupado por el agua. El suelo por su espesor varía desde unos pocos cm hasta 2-3 m expuestos al ambiente y de composición muy compleja, donde viven, se desarrollan las plantas además de una gran diversidad de seres vivos, cuyas características y propiedades se ven influenciadas por la acción de los agentes climáticos y bióticos, actuando sobre los materiales geológicos, acondicionados por el relieve y drenaje durante un período de tiempo. Una característica sobresaliente es que el suelo no es un medio inerte y estable, sino que se altera con el paso del tiempo.^[6, 7]

Figura 1. Fases que integran el suelo



Fuente: Dorronsoro C., 2004

El conocimiento del suelo es posible a través de estudios pedológicos en escalas compatibles con su posterior manejo, sin embargo, las propiedades del suelo varían significativamente en una unidad e incluso en pequeñas áreas inferiores a la unidad del suelo. Según la FAO; la sostenibilidad de la producción agrícola y del medio ambiente está fuertemente relacionada con el manejo y conservación del suelo, además, esta sostenibilidad se logra partiendo de un apropiado conocimiento científico y técnico del suelo, recurso limitado y no renovable en el corto y mediano plazo.^[8, 9]

3.2.1 Suelos altoandinos: Los bosques Altoandinos o montañosos ubicados en la cordillera de los Andes, en tierras frías y muy frías, entre los 2000 y 3000 msnm correspondiente a bosques nublados productores de agua, donde hay temperaturas comprendidas entre los 12 y 18 °C. Las especies que conforman el estrato superior son variadas, dominando el granizo y el tuno, plantas que se desarrollan a esta altitud y en suelos francos con alto contenido de materia orgánica siendo importantes como almacenadores y estabilizadores del carbono orgánico.^[10, 11]

Este tipo de suelos son andisoles y se clasifican dentro de la asociación *Typic Hapludands*, los limitantes más críticos para su uso y el manejo de estos suelos son: la reacción ácida (pH menores de 5,4) con altos contenidos de carbono en las capas superiores, altos porcentajes de saturación de aluminio, capacidad de intercambio catiónico de alta a muy alta, saturación de bases baja al igual que las bases totales, el fósforo disponible es bajo a muy bajo y la fertilidad natural es baja; también presentan pendientes inclinadas, susceptibilidad a la erosión y a los movimientos en masa. Su rasgo más sobresaliente es la formación masiva de complejos amorfos humus–aluminio (alófanos).^[11, 12]

3.3 FERTILIDAD DEL SUELO

El suelo es un sistema vivo, dinámico no renovable, cuya condición y funcionamiento es un factor importante en la generación de alimentos y en el mantenimiento de la calidad ambiental a nivel local, regional y global. No sólo es la base para la agricultura y para los diferentes ecosistemas, también depende toda la vida del planeta, razones por las cuales es de gran importancia realizar diversos análisis para determinar si las características que presenta, son óptimas para desarrollar sus funciones.^[13]

La fertilidad del suelo es una cualidad sobresaliente, producto de la interacción entre las características físicas, químicas y biológicas, se define como la capacidad del suelo para suministrar a las plantas agua y nutrientes esenciales para su crecimiento y desarrollo que brindan estabilidad y estructura, determinan la disponibilidad de nutrientes, sin presentar concentraciones tóxicas de ningún elemento y la actividad enzimática por acción de los microorganismos. Estas propiedades no actúan independientemente, sino en armónica interrelación que determinan la fertilidad del suelo y la capacidad de suministrar ambientes adecuados para el crecimiento y óptimo desarrollo de las plantas. Además cabe resaltar la composición de la roca madre, como precursora del suelo que es transformada por diversos procesos influenciados por factores como el tiempo, el clima y la vegetación, que determina en gran medida el grado de fertilidad del suelo.^[14, 15]

3.3.1 Propiedades que determinan la fertilidad del suelo: Las características que determinan la fertilidad del suelo se pueden clasificar en tres tipos físicas, químicas y biológicas:

3.3.1.1 Físicas. Condicionan y determinan en gran medida, la rigidez y la fuerza de sostenimiento, el desarrollo del sistema radicular y su facilidad de penetración, la aireación, la capacidad de drenaje y almacenamiento de agua, la plasticidad y la retención de nutrientes;^[16] entre estas propiedades se consideran:

❖ **Humedad.** Es la cantidad de agua que posee el suelo y es una de las características más sobresalientes que está determinada principalmente por la textura, la MO, composición de su fracción organomineral; así como del aporte natural (lluvia), artificial (riego) o por el consumo causado por la evapotranspiración; el tipo de agua que es retenida fuertemente por las partículas del suelo es la humedad higroscópica la cual no se encuentra disponible para las plantas puesto que las raíces carecen de la fuerza de succión necesaria para extraerla.^[17, 18]

❖ **Densidad aparente (Da).** Es la relación entre la masa del suelo y su volumen, es uno de los parámetros mínimos para evaluar la calidad de un suelo, indicando tanto su estructura, como su resistencia mecánica y la cohesión del mismo, revela la compactación del suelo y el número de poros.^[19]

❖ **Textura.** Se refiere específicamente a las fracciones de arena limo y arcilla (partículas < 2 mm de diámetro) que integran el suelo. Esta propiedad influye en la aireación, el movimiento y retención del agua, fijación y liberación de iones y en la clasificación del suelo; este parámetro tiene gran incidencia en la disponibilidad de nutrientes para el crecimiento de las plantas, la productividad, erodabilidad, uso y manejo de este.^[17]

Las características físicas del suelo son una parte necesaria en la evaluación de la calidad de este recurso, porque conforman una propiedad que no se puede mejorar fácilmente.^[20] En la tabla 1 se resumen algunas de estas propiedades.

Tabla 1. Propiedades físicas y su relación con la fertilidad del suelo

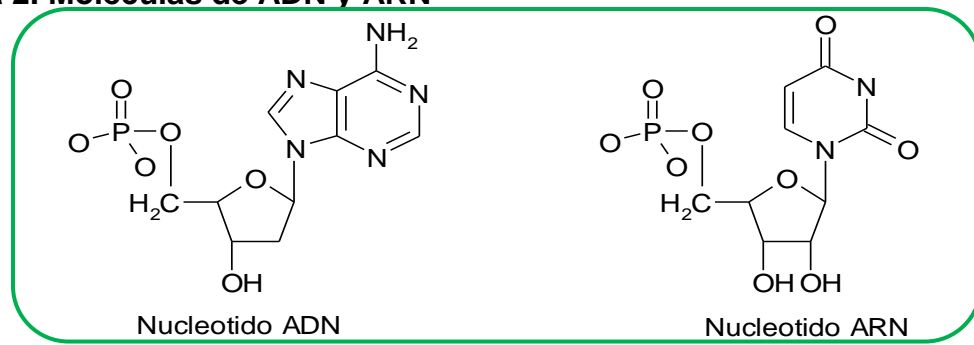
Propiedad físicas	Unidad de medida	Relación con la fertilidad del suelo
Humedad	Porcentaje (%)	Mejorar y estabilizar la estructura del suelo, además de favorecer el desarrollo de la plantas.
Densidad aparente	g.cm ⁻³	Indica el estado estructural del suelo.
Textura	Porcentaje arena, limo y arcilla (%)	Soporte para el sistema radicular de las plantas y su nutrición.

3.3.1.2 Químicas. Estas propiedades se refieren a condiciones que afectan las relaciones suelo-planta, la calidad y disponibilidad del agua, la capacidad amortiguadora del suelo, el reservorio y disponibilidad de nutrientes para las plantas y microorganismos.

Los indicadores químicos incluyen entre otras: pH, carbono orgánico (CO), materia orgánica (MO), capacidad de intercambio catiónico (CIC), acidez intercambiable (Ac Int.), Aluminio intercambiable (Al Int.), disponibilidad de nutrientes y sus formas químicas en el suelo que condicionan su biodisponibilidad.

- ❖ **pH.** Mide el grado de acidez de un suelo, es decir la concentración de iones H^+ presentes en la solución, tiene influencia indirecta en los procesos químicos, disponibilidad de nutrientes para las plantas, procesos biológicos y actividad microbiana. El pH del suelo también afecta la carga eléctrica de los componentes de la fracción coloidal por lo que en suelos con carga variable la retención de cationes aumenta en la medida que el pH del suelo, sea más alto y se reduce al acidificarse. En suelos ácidos se produce una competencia entre los iones H^+ con los cationes por los sitios de intercambio.^[14, 17]
- ❖ **P.** El fósforo es uno de los elementos indispensables para todas las formas de vida: Animal, vegetal y microbiano; al participar en muchas fases del metabolismo celular porque hace parte de estructuras como ácidos nucleicos (Figura 2) 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. El fósforo es relativamente estable en los suelos, no presenta compuestos inorgánicos que se pierdan por volatilización o lixiviación. Esta gran estabilidad resulta de una baja solubilidad lo que causa deficiencias en la disponibilidad de P, a pesar de la continua mineralización de compuestos orgánicos del suelo.^[21, 22]

Figura 2. Moléculas de ADN y ARN



Fuente: Stryer, L. 1982.

❖ **CIC.** Es la medida de la capacidad del suelo para retener superficialmente o liberar cationes en la solución de este, obedeciendo a diferencias de cargas electrostáticas que se definen por la cantidad de sitios disponibles para su almacenamiento. Los cationes que son retenidos quedan protegidos contra procesos de lixiviación evitando pérdida de nutrientes esenciales para la planta.

En la mayoría de los casos existe selectividad de un catión por otro, por lo tanto es un proceso competitivo y reversible. Los cationes más importantes en el proceso de intercambio catiónico son las bases del suelo (Ca^{+2} , Mg^{+2} , K^{+2} y Na^{+}) y NH_4^{+} en suelos ácidos, esta capacidad de intercambio catiónico se ve influenciada por el pH, tipo de arcilla y cantidad de MO.^[17]

❖ **Acidez intercambiable y Al intercambiable.** Es la acidez que está asociada al Al^{+3} y H^{+} , la acidez asociada a las formas de aluminio es la más importante en suelos que tienen $\text{pH} < 5.5$, ya que a partir de este valor empieza a aumentar la solubilidad del aluminio exponencialmente y puede llegar a concentraciones tóxicas para la planta.^[17]

❖ **Bases intercambiables.** Dentro de este grupo se consideran principalmente el Ca^{+2} , Mg^{+2} , K^{+} y Na^{+} por ser cationes cuya disponibilidad está asociada a la CIC y se mantienen adheridos a superficies de coloides cargados negativamente. Son de vital importancia para el desarrollo de la planta, se asocian a procesos de síntesis de proteínas y carbohidratos, aumentan la resistencia de la planta a las enfermedades, estimulan el desarrollo de las raíces y las hojas, entre otras funciones.^[22]

En la tabla 2 se describen algunas de las propiedades químicas relevantes para el suelo.

Tabla 2. Propiedades químicas y su relación con la fertilidad del suelo.

Propiedad químicas	Unidad de medida	Relación con la fertilidad del suelo
pH	$-\log[\text{H}^{+}]$	Modifica el grado de disponibilidad de los nutrientes y la actividad biológica en el suelo.
Carbono orgánico	Porcentaje de CO (%)	Brinda sustentabilidad a las condiciones agrícolas del suelo.
Materia orgánica	Porcentaje de MO (%)	Define la fertilidad, estabilidad y erosión del suelo.
Nitrógeno Total	Porcentaje de N Total (%)	Estimula el desarrollo y la actividad radicular de las plantas.

Continuación (Tabla 16)

CIC	meq.100g ⁻¹	Capacidad del suelo para retener o liberar cationes intercambiables.
Contenido de fósforo	mg.Kg ⁻¹	Después del N es el macronutriente que en mayor medida limita el rendimiento de los cultivos.
Acidez y Aluminio intercambiable	meq.100g ⁻¹	Interviene en la disponibilidad de fósforo y en el intercambio de elementos para la planta.

3.3.1.3 Biológicas. Se determinan por la actividad de los microorganismos del suelo, la microflora del suelo utiliza la materia orgánica como sustrato y fuente de energía; interviniendo en la producción de enzimas, en el ciclo del C y del N, en transformaciones biológicas de nutrientes y en los procesos de humificación y mineralización.^[23]

3.4 CARBONO ORGÁNICO DEL SUELO

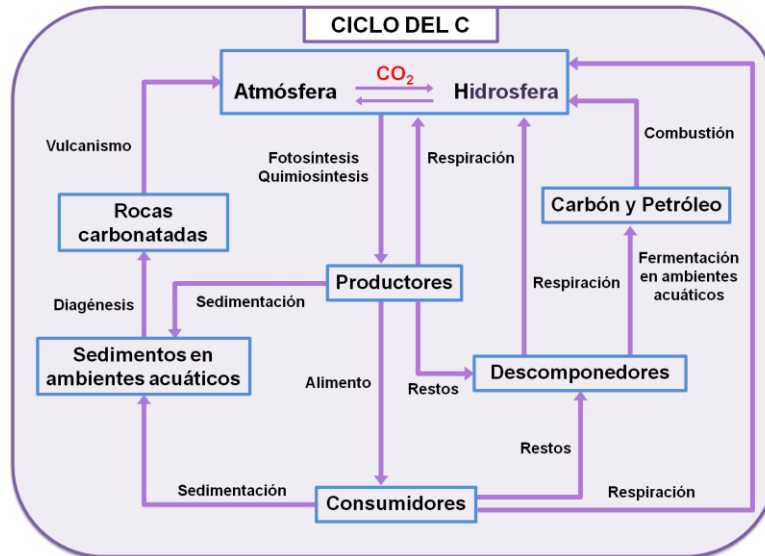
El Carbono (C) es un componente fundamental para la vida, está presente en la atmósfera, en la vida vegetal y animal, en la materia orgánica del suelo, en los combustibles fósiles, en las rocas, y también está disuelto en los océanos. La existencia de carbono orgánico, presente en los suelos naturales constituye un balance dinámico entre la absorción de material vegetal muerto y la pérdida por descomposición (mineralización). En condiciones aeróbicas del suelo, gran parte del carbono que ingresa al mismo es lábil y sólo alrededor del 1 % (55 Pg/año) se acumula en la fracción húmica estable.^[24]

La transformación de las moléculas que contienen C, de una forma a otra, se conoce como el ciclo del carbono (Figura 3), el cual se lleva a cabo por la fotosíntesis en plantas, la respiración en organismos y por la disolución de dióxido de carbono (CO₂) en el agua, que se describe tomando en cuenta los intercambios entre la atmósfera y la biosfera continental, así como las modificaciones causadas por las actividades humanas.^[25]

El Carbono, principalmente en forma de CO₂, se intercambia mediante procesos naturales entre la atmósfera, la vegetación terrestre y la hidrósfera; las plantas utilizan el CO₂ de la atmósfera y energía solar para convertirlo en carbono orgánico, fuente de energía para su metabolismo. 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; este incremento en la concentración atmosférica de CO₂ estimula el proceso de fotosíntesis y por consiguiente el crecimiento de las plantas. El ciclo de vida y muerte de las plantas tiene como resultado la acumulación de tejido vegetal en descomposición, tanto

superficial como subterránea (raíces vegetales), y produce una importante cantidad de carbono orgánico al suelo.^[26, 27]

Figura 3. Ciclo del Carbono



Fuente: Torres I., 2008

El grado de esta estimulación varía de acuerdo con diferentes estimaciones siendo mayor para los bosques hasta un 60 % y menor para los pastos y cultivos alrededor del 14 %. Los bosques más antiguos actúan como sumideros de carbono activo secuestrándolo, mientras que para los bosques en ausencia de perturbaciones se esperan que asimilen carbono durante 20-50 años después de su establecimiento y, por lo tanto, deberían considerarse como una opción temporal hasta que se desarrollen otras tecnologías para reducir las emisiones.^[24] La reducción a largo plazo de los niveles de CO_2 atmosférico requerirá de un compromiso social internacional en la disminución del uso de combustibles fósiles (carbón, petróleo, gas natural) y del desarrollo de fuentes alternativas de energía.

3.4.1 Calentamiento global y captura de carbono: Las etapas de descomposición y respiración que se desarrollan en los suelos, son de fundamental importancia para mantener el balance entre la producción y el consumo del CO_2 de la biósfera, tanto para reciclar el C de la atmósfera como en la formación de materia orgánica, la cual es reservorio no sólo del C atmosférico sino de otros elementos.^[28]

El carbono orgánico en el suelo, representa un balance de pérdidas y ganancias que se ven influenciados por procesos erosivos, de oxidación, humificación y escorrentía, motivo por el cual, la fijación de carbono se lleva a cabo

primordialmente en aquellos sistemas que aportan altos volúmenes de biomasa, mejoran la estructura del suelo, incrementan la actividad y diversidad de la fauna edáfica y propician mecanismos de ciclaje. Las prácticas de manejo convencionales como el arado, los patrones de cultivo y el uso de fertilizantes y plaguicidas, 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 (N₂O) y metano (CH₄) constituyentes principales de los gases efecto invernadero (GEI). Además, el manejo convencional ha promovido la pérdida de la materia orgánica, reduciendo la fertilidad, la capacidad de campo y la estabilidad estructural, lo que incrementa la erosión y el CO₂ atmosférico; por consiguiente, las prácticas agrícolas convencionales han contribuido al calentamiento global.^[28, 29]

El protocolo de Kyoto reconoce que el mal uso de los suelos incrementa a las emisiones netas de carbono hacia la atmósfera, contribuyendo en forma negativa al calentamiento global. El sobrepastoreo de las tierras que aumenta la emisión de metano por el ganado hace que se incrementen los niveles de carbono en la atmósfera; siendo una de las principales causas de 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, puesto que la quema, principalmente de bosques nativos se hace para aumentar las tierras destinadas a la agricultura o pastoreo, lo que involucra pérdidas de carbono vegetal hacia la atmósfera; de acuerdo a lo anterior el Protocolo de Kyoto, planteó la necesidad de crear una amplia base de datos que permitiría dar origen a políticas claras para enfrentar la problemática a nivel global, en la cual, los suelos cesen en su característica de vertedero para el CO₂ en algún momento del futuro, y se conviertan en fuente de esta; manifestando la importancia de los suelos agrícolas como sumideros de carbono atmosférico y su contribución a la mitigación del cambio climático.^[30, 31]

Históricamente se han notado grandes variaciones en las emisiones correspondientes al cambio de uso de la tierra, deforestación e incremento del pastoreo y de las tierras cultivadas, fueron encontradas cerca de 140 Pg entre 1850 y 1990, con una liberación neta hacia la atmósfera de 25 Pg de carbono. De acuerdo con IPCC, la pérdida histórica de los suelos agrícolas fue de 50 Pg de carbono en el último medio siglo, lo cual representa un tercio de la pérdida total del suelo y la vegetación.^[24]

3.5 MATERIA ORGÁNICA EN EL SUELO

La materia orgánica (MO) es uno de los componentes del suelo más complejos y heterogéneos que existen en la naturaleza, se evidencia en su composición química. Según la sociedad de la ciencia del suelo de América se define como “La fracción orgánica del suelo que incluye residuos vegetales y animales en

diferentes estados de descomposición, tejidos y células de organismos que viven en el suelo y sustancias producidas por los habitantes del suelo". En esta definición se incluye todos los componentes de origen biológico existentes en el suelo; como micro y mesoorganismos, raíces y todo material que provenga de organismos y sus productos de transformación, descomposición y síntesis, materiales muy poco alterados como aquellos otros que si han experimentado profundos cambios en el suelo. La MO tiene un rol importante en la estructuración y en la formación de productos durante la degradación que intervienen en el crecimiento de las plantas; estos residuos orgánicos, están dentro y sobre la superficie del suelo los cuales presentan 2 procesos de transformación humificación o mineralización de acuerdo a sus características climáticas y pedológicas puede ser lento o rápido.^[22, 32]

El contenido de la MO en un suelo se ve influenciado por las prácticas agronómicas como el tipo de cultivo, rotaciones y manejo de sus residuos; propiedades como la agregación del suelo, la textura y la mineralogía controlan la materia orgánica en macroagregados y por lo tanto, la labranza tiene un gran efecto sobre el tamaño de esos reservorios.^[33]

El manejo adecuado de la materia orgánica, especialmente en las regiones tropicales, donde las temperaturas son elevadas y en algunas zonas, la alta humedad acelera la descomposición de los suelos, es todavía más importante. Se distinguen 2 fracciones de la materia orgánica del suelo (MOS); una fracción lábil denominada materia orgánica fresca (MOF), que mantiene las características químicas de su material de origen (hidratos de carbono, ligninas, proteínas, taninos, ácidos grasos), suministra energía para la meso y macrofauna del suelo, es altamente sensible a cambios en el uso y manejo de este, fluctúa con la estación del año y es susceptible al proceso de mineralización; y una fracción altamente estable denominada materia orgánica humificada o humus (MOH) constituida por las sustancias húmicas (ácidos húmicos, ácidos fúlvicos y huminas), está fuertemente unida a la fracción mineral a través de diferentes tipos de enlaces, favorece la formación de una estructura edáfica adecuada, mejorando las propiedades fisicoquímicas del suelo y reduce notablemente la actuación de fenómenos de degradación tan extendidos como la erosión hídrica.^[17, 33-35]

La MOF representa un pequeño porcentaje total de la MO, es la más dinámica y sensible en el transcurso del tiempo; se asocia fuertemente a la productividad y fertilidad del suelo debido a su capacidad para suministrar nutrientes tales como N, fósforo (P), azufre (S) y micronutrientes. De este modo, la determinación de la fracción lábil provee un parámetro de fertilidad, productividad potencial y sirve como un índice temprano de cambio en la MO total.^[33]

El humus es un producto de descomposición parcial de la MOF con posterior síntesis, de color negro oscuro de la fase coloidal del suelo es fundamental en la formación y estabilización de los agregados, en el control de la acidez, en el

reciclaje de elementos nutritivos, en la desintoxicación de compuestos peligrosos que llegan al suelo y en su fertilidad; adicionalmente aporta a la degradación y detoxificación de herbicidas y pesticidas del suelo. Las sustancias húmicas son el principal componente de la MOS y representa, por lo menos el 50 % de esta.^[17, 34]

3.5.1 Clasificación de las sustancias húmicas: Corresponde a polímeros orgánicos de cadenas largas que contienen gran cantidad de grupos funcionales como carboxílicos, fenólicos, alcohólicos, enólicos, cetónicos e hidroxiquinonas; asociados a la fracción arcillosa brindándole estabilidad y poco acceso al ataque bacteriano de la microflora del suelo por lo tanto su aporte de nutrientes es muy bajo.

Las sustancias húmicas se clasifican con respecto a su solubilidad, peso molecular y grado de polimerización; se toma como base su solubilidad en diferentes solventes; así aparecen tres grupos: ácidos fúlvicos, ácidos húmicos y huminas.^[36]

3.5.1.1 Ácidos fúlvicos. Los AF son sustancias móviles, solubles en ácido y álcali, son aparentemente materiales jóvenes no asociados con la fracción mineral, formados por polisacáridos, aminoácidos y compuestos fenólicos, presentan contenidos altos de grupos carboxílicos y pesos moleculares bajos (< a 5 KDa); para algunos investigadores los AF son fragmentos oxidados de los ácidos húmicos (AH), mientras que para otros son los precursores de los AH. Los AF están formados por polisacáridos, aminoácidos, compuestos fenólicos, entre otros, con un contenido alto en grupos carboxílicos. 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.).^[37-41]

3.5.1.2 Ácidos húmicos. Los AH son sustancias solubles en álcali e insolubles en ácido. Es la fracción de la MOS biológicamente más resistente, con una gama amplia de estructuras aromáticas condensadas y envueltas por componentes de cadenas alifáticas. Poseen mayor peso molecular que los AF, generalmente son polímeros de alto grado, conformados por monómeros y estos a su vez formados por unidades estructurales. Estas unidades se componen de: 1) un núcleo, 2) una cadena puente, y 3) grupos orgánicos reactivos (compuestos aromáticos, estructuras alifáticas y biopolímeros de carbón altamente funcionales que estabilizan los suelos) se presentan entrelazados formando coloides esferoidales, alto carácter ácido, capacidad de intercambio catiónico se basa principalmente en la presencia de radicales COOH y OH.^[37-43]

3.5.1.3 Huminas. Corresponden al grupo de sustancias húmicas que no se extraen con soluciones alcalinas, insolubles en cualquier pH, poco retendedoras de agua y de metales frente a los AH y AF. Se consideran que son ácidos húmicos que han perdido la capacidad de disolverse en álcali. Esto debido a la alteración de las propiedades químico coloidal, provocado por desecación e interacción de los ácidos húmicos con la fracción inorgánica del suelo. En el suelo se encuentran en diferentes estados como “humina microbiana”, formada por metabolitos microbianos y por compuestos alifáticos que derivan de ellos, “humina heredada”, próxima a la MOF, constituyente de las membranas, “humina neoformada”, resultado de procesos de inmovilización por los cationes y no es extraíble por reactivos alcalinos, y finalmente la “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.^[37-41, 44]

3.5.2 Importancia de la Materia Orgánica en el Suelo: La contribución de la materia orgánica en la productividad de los suelos ha sido reconocida en la agricultura tradicional como la base de la fertilización, de allí la importancia de su cuantificación en el suelo, por tanto, se considera un factor clave en la fertilidad del mismo. La materia orgánica incide en las propiedades físicas mejorando su estructura, formación y estabilidad de agregados, la capacidad de retención de agua y aireación, previniendo así los procesos de erosión; sobre las propiedades químicas las cuales son un agente amortiguador, que evita cambios bruscos del pH por componentes externos al suelo, disminuyendo los efectos de las perturbaciones ambientales. Finalmente, dicha materia orgánica influye en las propiedades biológicas, como la reserva de energía que mantiene la actividad microbiana del suelo; también actúa como: reserva y fuente de nutrientes (nitrógeno, fósforo, azufre, boro, zinc, entre otros) mediante los procesos de mineralización y proporciona una alta capacidad de cambio de cationes. Debe resaltarse que gran parte de estas funciones dependen de la descomposición de la MO.^[23,45,46]

Actualmente la función más relevante del contenido de materia orgánica de un suelo, es su capacidad de controlar la acción de los gases de efecto invernadero ya que actúan como un sumidero de carbono.^[24]

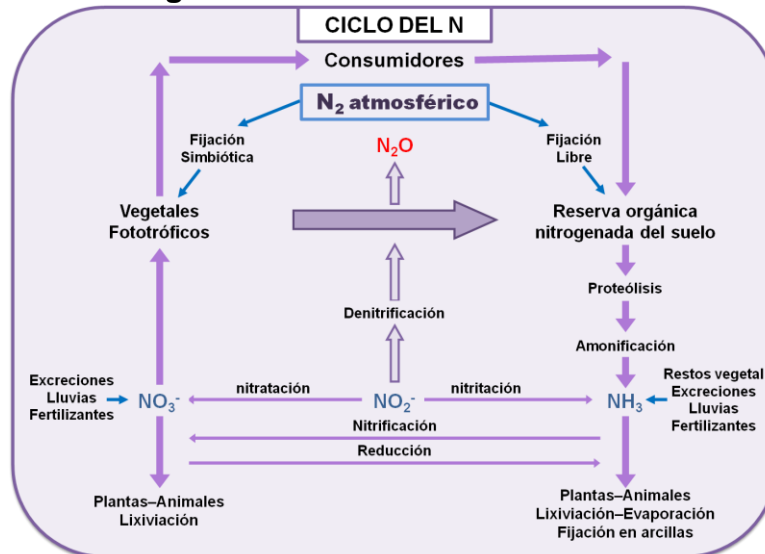
3.6 NITRÓGENO EN EL SUELO

El nitrógeno (N) es uno de los elementos más ampliamente distribuidos en la naturaleza, es muy dinámico, circulando entre la atmósfera, el suelo y los organismos vivos. Es uno de los principales constituyentes de compuestos vitales como aminoácidos, proteínas, enzimas, nucleoproteínas, ácidos nucleicos, así como también de las paredes celulares y clorofila en los vegetales.^[47]

La principal fuente de N es la atmósfera, donde es un gas predominante (79 % del volumen), por ser un gas diatómico e inerte debido a su alta energía de enlace, en términos termodinámicos, el nitrógeno gaseoso (N_2) es su forma más estable. Las otras formas químicas del nitrógeno reierten a N_2 bajo condiciones de equilibrio; esto explica por qué el nitrógeno molecular es el principal depósito para los organismos vivos, no obstante, muy pocos organismos tienen la capacidad para fijar el nitrógeno gaseoso. De hecho, sólo un reducido grupo de eubacterias (fototróficas y heterotróficas) y arqueobacterias exhibe dicha capacidad. El reciclaje del nitrógeno depende entonces de las transformaciones químicas de compuestos nitrogenados disponibles, a través de reacciones de óxido-reducción.^[47]

Los procesos de transformación química que intervienen en el ciclo de nitrógeno (Figura 4) son varios: la fijación de N_2 (gas) a formas combinadas se produce a través de la fijación biológica (simbiótica o asimbiótica), la asimilación de amonio o asimilación reductiva de NO_3^- , las formas orgánicas son convertidas a NO_3^- o NH_4^+ (iones asimilables) por mineralización e inmovilización, pero el NO_3^- puede volver a la atmósfera en forma de N_2 por una reducción disimilativa por medio de la denitrificación o perderse por lixiviación.^[48]

Figura 4. Ciclo del Nitrógeno



Fuente: Bravo I.,

Las reservas de N en el suelo están constituidas por: la materia orgánica de descomposición rápida, compuestos húmicos de mineralización más lenta y una pequeña fracción se encuentra en combinaciones inorgánicas como NH_4^+ y NO_3^- formas que son aprovechables para la planta. Aproximadamente el 98 % del nitrógeno del suelo se encuentra formando compuestos orgánicos quedando disponible para las plantas a través del proceso de mineralización.^[47]

Las actividades antrópicas como la agricultura y la ganadería, han aumentado el nitrógeno al interior de los ecosistemas, generando pérdidas de aniones y cationes del suelo, procesos de acidificación e incremento en la salida de Nitrógeno a sistemas acuáticos.^[29]

3.7 ALÓFANOS

El alófono es un grupo de silicatos de aluminio hidratados no cristalinos del tamaño de la arcilla con diferente relación sílice/aluminio, cuya fórmula empírica es $m\text{Al}_2\text{O}_3$, $n\text{SiO}_2$ y H_2O ; resultan de la meteorización de cenizas volcánicas. Los elementos del ambiente que controlan la formación del alófono son primordialmente el material geológico, la vegetación y el clima. Todos los alófanos son materiales amorfos de rango corto que poseen uniones Si-O-Al, asimismo presentan una relación atómica Al/Si entre 1 y 2; así pues en la naturaleza existen alófanos ricos en aluminio (Al/Si = 2:1) y ricos en silicio (Al/Si = 1:1).

El alófono tiene cargas negativas en la superficie cuando se presentan pH altos, a través de la disociación de iones de H^+ desde los grupos siloxano y éstos presentan carga positiva en su superficie a pH bajos debido a la aceptación de protones por el grupo aluminol (Al-OH).^[48, 50]

Las características más comunes de los suelos en Colombia ricos en alófanos y que son formados a partir de cenizas volcánicas son: baja densidad aparente ($< 1 \text{ g/cm}^3$), alta MO, alta CIC, baja saturación de bases, elevada capacidad de retención de agua, alto poder de fijación de fosfatos, pH ácido o ligeramente ácido, adsorbe cationes y aniones por sus propiedades isoeléctricas lo cual depende del pH que regula la ionización de sus grupos activos.^[51]

Su importancia en los suelos del Cauca, radica en su capacidad de adsorción de fosfatos reflejada en una fuerte indisponibilidad de este nutriente en la mayoría de los suelos del departamento, lo que conlleva al incremento en la utilización de los fertilizantes fosfatados en estos suelos para nutrir las necesidades de los cultivos; en consecuencia, tiene grave impacto sobre el sustrato y cuerpos de agua que por percolación sufren problemas de eutrofización en las zonas.

Las propiedades de los andisoles se derivan de la naturaleza de su fracción coloidal observándose que en ambientes húmedos, de climas templados y fríos esta fracción se constituye por complejos de humus-aluminio o por alófanos/imogolita; las primeras se originan en lugares ricos en carbono orgánico y a pH ácidos.^[50]

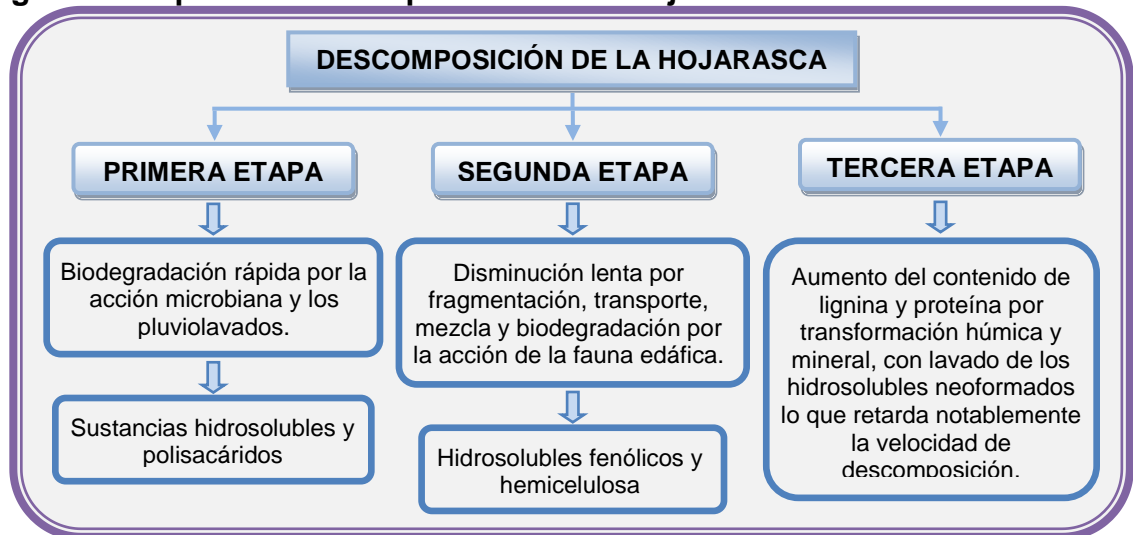
La mineralización de la MO se ve influenciada por la presencia de alófanos en el suelo, los cuales reducen la velocidad de mineralización de esta en comparación a suelos no alofánicos.^[52]

3.8 PAPEL DE LA HOJARASCA EN EL SUELO

En la actualidad se usan varias definiciones para el término hojarasca, algunos lo definen como uno de los horizontes constituyentes del suelo Ao el cual está constituido por un conjunto de órganos vegetales como hojas, tallos, frutos, flores, etc., que relacionan los sistemas suelo y planta; esta es primordial para la estabilidad y el funcionamiento del ecosistema, pues constituye la fuente principal de circulación de materia orgánica, energía y nutrientes entre las plantas y el suelo. Las variaciones estacionales en el aporte de hojarasca al suelo están reguladas por procesos y factores biológicos, climáticos, la topografía del terreno, condiciones edáficas, especies vegetales, edad y densidad del suelo.^[53, 54]

La hojarasca cumple una función mejoradora de las condiciones físico-químicas, regula el régimen de fluctuación diaria de la temperatura, desempeña un importante papel hidrológico y antierosivo atenuando las bruscas fluctuaciones de la humedad de la superficie del suelo. Durante el proceso de descomposición de la hojarasca inicialmente se libera la fracción lábil (azúcares y proteínas) y luego la fracción recalcitrante (lenta descomposición) como la ligninas y los fenoles; por consiguiente, se reconocen tres etapas esenciales en el ciclo de descomposición de la hojarasca (Figura 5).^[55, 56]

Figura 5. Etapas de descomposición de la hojarasca



Fuente: Cardenas S., 2007.

Cabe resaltar que el contenido de hojarasca en un ecosistema depende del balance entre los procesos de acumulación y descomposición, lo cual está determinado por factores tales como: la especie de planta y su composición

química (ligninas, celulosa, hemicelulosa), las condiciones climáticas y la actividad de la fauna edáfica. El clima modifica notablemente la naturaleza y la rapidez de la descomposición de los restos vegetales en la superficie del suelo, de modo que ejerce una importante influencia en el tipo y la abundancia de la MO. La producción de hojarasca en suelo es superior cuando se encuentran bajo una cobertura arbórea, debido a que el potencial de evapotranspiración se ve reducido y, por lo tanto, hay un mayor ahorro del agua, lo que unido al incremento de la materia orgánica, la menor mineralización y la mayor permeabilidad del suelo hace que la eficiencia de la fotosíntesis sea de cuatro a cinco veces mayor que cuando las plantas se encuentran a pleno sol.^[56]

La hojarasca se clasifica en tres tipos: mejorante, tiene hojas poco lignificadas y ricas en N con una relación C/N inferior a 25; la acidificante, que contiene altas concentraciones de lignina, lípidos y taninos con una relación C/N mayor a 50 y la hojarasca indiferente, que posee características intermedias entre las dos mencionadas anteriormente con una relación C/N de sus residuos vegetales no lignificados de 30 a 50.^[53] Como resultado de la descomposición se liberan nutrientes minerales (mineralización) aunque si la relación C/N de los restos orgánicos es relativamente alta, hay una retención temporaria de nutrientes minerales en la biomasa microbiana (inmovilización). El resto de la materia orgánica fresca incorporada al suelo es sometida a complejas reacciones bioquímicas y químicas (humificación), dando lugar a la formación del humus.^[57]

3.9 GRADO DE MINERALIZACIÓN Y HUMIFICACIÓN DE LOS SUELOS

En el suelo los microorganismos (bacterias y hongos) realizan los procesos de transformación de la MO a sustancias más simples o sintetizando estructuras más complejas, que son utilizadas como fuente de energía para su desarrollo; estos procesos se conocen como mineralización y humificación de la materia orgánica. La concentración de humus del suelo al igual que sus propiedades, dependen de la capacidad mineralizante de la biomasa y del aporte de la materia orgánica que se realiza al suelo de forma natural (hojarasca) o artificial (estiércol, compost, etc.), por consiguiente, la relación del contenido de carbono orgánico con el nitrógeno (C/N) indican la velocidad de descomposición de la MO.^[58, 60]

Mediante el proceso de mineralización, algunos nutrimentos se transforman de una forma orgánica no aprovechable para la planta, a una forma inorgánica asimilable; tal es caso del nitrógeno, fósforo y azufre, este proceso en los suelos se ve influenciado por la temperatura, humedad, pH y las arcillas de cenizas volcánicas, factores que afectan también la actividad enzimática y el crecimiento microbiano. Se sabe que a medida que aumenta la temperatura la descomposición de la MO es más alta, hecho que explica la acumulación de esta en suelos de clima frío; la aireación y la humedad son dos factores que están asociados y que

perjudican los procesos de descomposición o mineralización de la materia orgánica. En condiciones de baja disponibilidad de oxígeno (medio anaeróbico) el proceso de descomposición de la materia orgánica es menos eficiente.^[60]

Para que se lleve a cabo una adecuada humificación de la MO es necesaria una buena actividad biológica, adecuada aireación y riqueza de C y N en el suelo; así como la descomposición rápida de la MOF. La microflora edáfica que participa en la descomposición y mineralización de la materia orgánica requiere C como fuente de energía y N como intermediario en la síntesis de proteínas. Es de vital importancia destacar que si en un suelo, la relación C/N en la materia orgánica es elevada, los microorganismos disponen de C en exceso, pero carecen de N, con lo cual son pocos los microorganismos que pueden actuar en la degradación de la materia orgánica. Como consecuencia, el proceso de mineralización se ralentiza, y el NH_4 o NO_3^- disponibles para las plantas superiores se encontrarán en baja cantidad en el suelo; de este modo, se puede decir que la relación C/N tiene gran importancia en la valoración de la fertilidad del suelo.^[58]

El contenido de nitrógeno es el factor limitante en la descomposición de los residuos orgánicos del suelo, en general se considera que la velocidad de descomposición del material orgánico dado, es proporcional a su contenido de nitrógeno y es importante en este caso tener en cuenta el contenido de nitrógeno con respecto al carbono, es decir su relación C/N. Por ello, el valor óptimo de la relación C/N varían entre 10–14 en un suelo agrícola, valores inferiores a 10 indican fuerte mineralización con pérdida de MO y procesos de erosión, valores entre 15–20 indican que los microorganismos tienen el nitrógeno que necesitan y no hay liberación de este, mientras que valores superiores a 20 indican deficiencia de N para los microorganismos, por lo tanto inmovilización del N y deficiencia para los cultivos.^[22, 60, 61]

Se ha evidenciado que la precipitación pluvial es un factor más influyente que la temperatura en la acumulación de C y N, debido a que la alta disponibilidad de agua estimula el crecimiento de las plantas y por consiguiente el aumento en la producción de material vegetal crudo para la síntesis del humus. Mientras que el C fijado por la biomasa proviene del CO_2 atmosférico, es reducido durante el proceso de fotosíntesis por las plantas, y suele oscilar en torno a un 50–60 % de la materia orgánica. Sin embargo, la concentración de N es mucho menor y más variable, ya que por este elemento entran en competencia las raíces de las plantas y los microorganismos, lo que lo lleva a ser un factor limitante.^[29, 58]

La calidad de la MO del suelo depende de la madurez medida, esto debe estar de acuerdo con lo evaluado en la relación de la materia orgánica humificada (MOH) y la materia orgánica fresca (MOF) así como la Relación de Humificación (RH).^[61-64]

Se han reportado trabajos en Andisoles, en los cuales se observa que el grado de humificación de la MOS se ve influenciado por el contenido de alófanos.^[65]

4. METODOLOGÍA

4.1 FASE DE CAMPO

Estos análisis se realizaron conjuntamente con estudiantes de maestría y pregrado pertenecientes al grupo de investigación de agroquímica.

4.1.1 Localización de la zona de estudio: Los suelos altoandinos utilizados en este estudio se encuentran en un rango de altura entre 2850–3238 msnm, con clima frío-húmedo (temperatura media anual de 10.4 °C y precipitaciones medias anuales entre 1050 a 1200 mm). Orden de clasificación andisoles, asociación **Typic Hapludands** ^[11] localizados entre las coordenadas 2° 26' 17.73" N, 76° 24' 17.32" W, situados en la microcuenca Santa Teresa, cuenca andina de alta montaña del río Las Piedras, ubicada en el municipio de Totoró, Cauca (Figura 6). Estos suelos se caracteriza por presentar aún bosques primarios, pero con expansión de su frontera agrícola con actividades agropecuarias asociadas a cultivos de papa y pastoreo de animales.

Figura 6. Ubicación de la zona de estudio en el mapa del Cauca



Fuente: http://www.trazascauca.gov.co/tz_paginaEstadistica/Popayan

4.1.2 Modelo experimental de muestreo de los suelos: Las unidades experimentales se seleccionaron considerando el uso de suelo (con sistemas de bosque, cultivo y pastura) en la zona.

Teniendo en cuenta el área dedicada a cada uso y con base en los resultados previos de de carbono stock realizados en las muestras representativas de los diferentes usos, se aplica la Ecuación 1, utilizada en delimitación de área para muestreo de suelos en secuestro de carbono [66], obteniéndose siete unidades experimentales (Tabla 3, Figura 7), dando como resultado un modelo de muestreo aleatorio estratificado. Las unidades experimentales se distribuyen de la siguiente forma:

- ❖ Tres unidades de muestreo para bosque que se denominan: bosque, bosque I y bosque II.
- ❖ Tres unidades para pastura a las que se les denomina: pastura I, pastura II y pastura III.
- ❖ Una unidad para cultivo.

Ecuación 1. Fórmula de Pearson

$$n = \frac{(N \times s)^2}{\frac{N^2 \times E^2}{t^2} + N \times s^2}$$

Donde:

E: Error permitido. Se calcula multiplicando el porcentaje de carbono/ha por la precisión deseada (0,1, el 10 por ciento de precisión)

t: La muestra estadística de la distribución t para un nivel de confianza del 95%. (t se fija generalmente en 2 porque el tamaño de la muestra es desconocido en esta etapa)

N: Número de unidades de muestreo para el estrato h (h: área total del estrato en hectáreas/área de la parcela en hectáreas)

n: Número de unidades de muestreo en la población

s: Desviación estándar del C stock determinado en el estrato h

Tabla 3. Número de unidades de muestreo a analizar

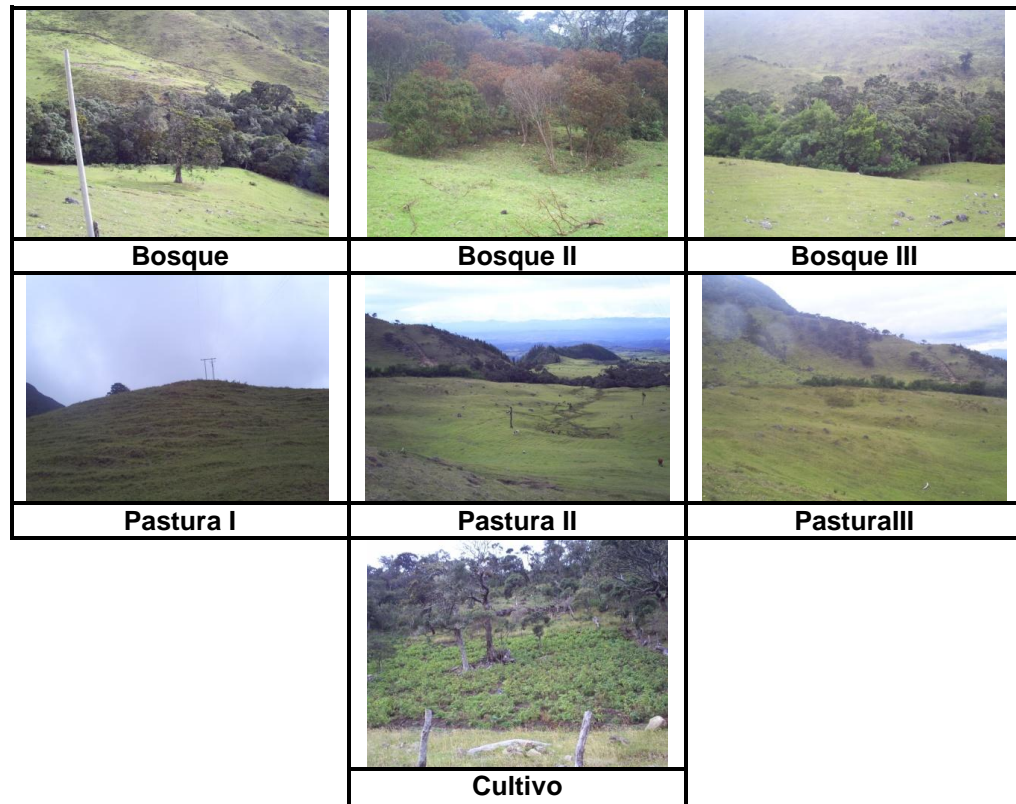
	Área (ha)	C Stock (Ton/ha)	# Unidades Muestreo Calculadas	# Unidades Muestreo Tomadas
Bosque	400	228	3,8	3
Pastura	682	134	4	3
Cultivo	158	195	1	1

En el sitio de muestreo no fue posible obtener las cuatro unidades de muestreo correspondientes a bosque y pastura porque no hubo uniformidad en las condiciones del suelo, por lo tanto se decidió tomar tres unidades para cada uno de estos usos con el mismo tipo de suelo **Typic Hapludands**.

Las muestras se tomaron en el **horizonte A** correspondiente a una profundidad de 20 cm en bosques y cultivo, y a 10 cm en pastura. Cada parcela se delimitó por una cuadrícula de 400 m² tomando un kilogramo de muestra cada 5 metros, para un total de 25 submuestras, debidamente georeferenciadas usando un GPS (Garmin 60CS, Alemania). En la unidad experimental denominada bosque II se tomaron 15 submuestras, porque aún cuando existe uniformidad en georeferenciación y grado de inclinación, en la parcela seleccionada no se encontró uniformidad en textura al tacto, en color y en propiedades organolépticas, además se denota el paso del ganado por entre las calles de algunos de los árboles, que afectarían la medida de las diferentes variables.

Para determinar la relación de humificación fue necesario formar muestras compuestas para cada unidad experimental, las cuales se obtuvieron a partir de la mezcla de las submuestras tomadas en cada parcela, una vez retiradas las porciones necesarias para su caracterización. La toma de cada muestra en el laboratorio para la determinación respectiva se hizo mediante el método del cuarteo. El grado de inclinación fue medido usando un CLINOMETRO (Konus, Alemania) y varía de 6° a 33° (cultivo 6°, bosque 10° y pastura 11°).^[67]

Figura 7. Sitios de muestreo en la microcuenca Santa Teresa



Fuente: Arboleda y Martínez, 2012.

El tipo de vegetación predominante en los bosques es motilón (*Freziera canescens*) y en menor proporción encenillo (*Weinmannia tomentosa*) y Quina (*Cinchona ónpubescens*). La variedad de pastos es kikuyo (*Pennisetum clandestinum*), los bosques tienen un tiempo de permanencia de aproximadamente 15 años e igualmente el suelo dedicado a pasto. El suelo dedicado a cultivo de papa parda (*Solanum tuberosum*) es reciente (1 año). El área agrícola es poco tecnificada, con labranza conservacionista y gran parte de esta es de subsistencia. Las actividades pecuarias se realizan en pastos con labranza cero para ganadería extensiva.

4.2 FASE DE LABORATORIO

Con el fin de determinar las características del suelo, se realizaron análisis físicos y químicos de acuerdo a la metodología estandarizada en el Laboratorio de Agroquímica de la Universidad del Cauca, con las determinaciones de: HH, Da, Textura, pH, CO, N total y P disponible en las 165 muestras individuales y para las muestras compuestas se efectuaron las determinaciones antes mencionadas además de: Acidez int., Al int., CIC y Bases de cambio.^[68]

4.2.1 Caracterización física y química: Las 165 submuestras y las muestras compuestas se llevaron al laboratorio de Agroquímica en el cual se secaron a temperatura ambiente, se trituraron y se pasaron por tamiz de malla 2 mm.

4.2.1.1 Caracterización física de los suelos. Los análisis físicos comprenden las siguientes determinaciones.

❖ **Humedad higroscópica (HH):** 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.

La humedad se determinó en este caso por el método gravimétrico es la relación entre la masa de agua y la masa de los sólidos del suelo. Consiste en pesar 10 g de la muestra en una cápsula de porcelana previamente tarada y se lleva a una estufa por 24 h a 105 °C con el objeto de eliminar el agua superficial; se enfrió en un desecador y posteriormente se pesó. Con la diferencia de pesos se determina la humedad de la muestra.

❖ **Densidad aparente (Da):** Es la relación entre la masa del suelo y su volumen; para determinar la densidad aparente por el método del cilindro, en el sitio de muestreo cada cilindro se introdujo en el horizonte A de cada parcela, ejerciendo presión vertical, se saturó de suelo indisturbado, enrazando con una navaja. Se secaron a 105 °C durante 24 h; nuevamente se pesó por separado, considerando los pesos y conocidas las dimensiones, se calculó el volumen de acuerdo a la Ecuación 2 y el valor de densidad aparente se halló mediante la Ecuación 3.

Ecuación 2. Expresión para la determinación de volumen del cilindro

$$V_{cilindro} = \pi r^2 H$$

Dónde:

r es el radio del cilindro

H la altura del mismo.

Ecuación 3. Expresión para la determinación de densidad

$$DENSIDAD = \frac{\text{Masa del suelo en el cilindro (g)}}{\text{volumen ocupado por el suelo en el cilindro (cm}^3\text{)}}$$

❖ **Textura:** La textura permite mediante el método de Bouyoucos, determinar tanto la cantidad de sólidos en suspensión por medio del Hidrómetro a diferentes tiempos, como la profundidad del centro de flotación del hidrómetro que varía con la densidad de la suspensión y con la textura. Este método se fundamenta en la Ley de Stokes, por lo tanto la velocidad de caída de las partículas de diferente tamaño en un medio líquido, son directamente proporcional al cuadrado del radio de la partícula; de manera que después de 40 seg todas las partículas mayores de 50 µm se sedimentan sin influir sobre el hidrómetro, tiempo en el cual se han sedimentado las arenas midiéndose la densidad de limos mas las arcillas. Las lecturas realizadas una hora después, corresponden a partículas mayores de 5 µm y a las 2 h después, corresponden a partículas menores de 2 µm; tiempo en el cual han sedimentado los limos, quedando en suspensión las arcillas. La lectura se visualiza sobre una escala que este contiene y el valor observado se convierte a densidad mediante una escala adecuada.

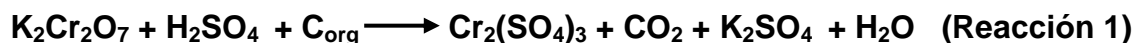
Para determinar la textura de las muestras de suelo en estudio, se pesaron 100 g de suelo seco, se adicionó 160 mL de agua destilada, luego se mezcló, se agregó 10 mL de solución dispersante de hexametáfosfato de sodio ((NaPO₃)₆) agitando la solución de suelo durante 2 h para transferirse a un cilindro de Bouyoucos, se completa con agua destilada hasta la segunda línea

del cilindro; se agita fuertemente por 30 seg, se introduce el hidrómetro y se toman dos lecturas: la primer lectura a los 40 seg y la segunda lectura se realiza a las 2 h.

4.2.1.2 Caracterización química de los suelos. Los análisis químicos incluyen las siguientes determinaciones.

- ❖ **pH:** El pH Se determinó mediante el método potenciométrico, que permite cuantificar la actividad de los iones H^+ en el suelo, utilizando un pH-metro (744 Metrohm, Suiza) con electrodo combinado de vidrio en una suspensión suelo-agua relación 1:1; se pesaron 5 g de suelo y se les adicionó 5 mL de agua destilada, se agitó intermitentemente durante 1 h, se dejó en reposo durante 1 min y por último se midió el valor del pH.

- ❖ **Carbono orgánico (CO):** Se realizó mediante el método de Walckley-Black, que consiste en oxidar el carbono orgánico presente en el suelo con un oxidante en medio ácido, utilizando como oxidante dicromato de potasio ($K_2Cr_2O_7$ 1N) y como medio ácido sulfúrico concentrado (H_2SO_4). La reacción toma el calor de la disolución del ácido, lo que eleva la temperatura y logra la oxidación del carbono orgánico, luego de 12 h de reposo, la muestra se lee en un espectrofotómetro UV-VIS a 585 nm (Spectronic Unicam Genesys 20, USA). La reacción generada es la siguiente:



Se preparó la curva de calibración con patrones de 0,84; 1,68; 3,36; 4,20; 6,30; 8,40 mg C a partir de una solución patrón de Sacarosa al 5 %, el contenido de carbono orgánico (%CO) en la muestra de suelo se obtuvo al interpolar el valor de absorbancia en la curva de calibración los cuales fueron sometidos al mismo procedimiento.

El porcentaje de carbono se calcula de la siguiente manera:

Ecuación 4. Expresión para la determinación de %C

$$\%CO = \frac{mgCx(100 + \%humedad)}{w muestrax1000}$$

A partir del resultado anterior se determina el porcentaje de materia orgánica según la fórmula:

Ecuación 5. Expresión para la determinación de %MO

$$\% MO = \%CO \times 1,724$$

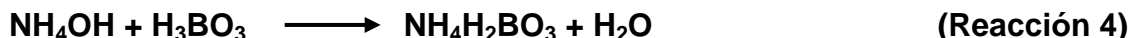
1,724 = Factor de Van Bemmelen para convertir el CO en materia orgánica.

- ❖ **Nitrógeno (N Total):** Se determina el N Total mediante el método de Kjeldahl, en un equipo BÜCHI (Büchi Scrubber B-414, Suiza). El proceso consta de tres etapas:

Oxidación de la muestra: La muestra de suelo se trató con ácido sulfúrico concentrado (H_2SO_4) y una mezcla catalizadora de $CuSO_4$, Selenio y K_2SO_4 ; con el propósito de oxidar la materia orgánica y convertir el nitrógeno en sulfato ácido de amonio según la siguiente reacción:



Descomposición del sulfato ácido de amonio: El sulfato ácido de amonio se descompone por medio de un exceso de álcali para liberar el amoniaco el cual se recoge por destilación sobre ácido bórico. Las reacciones son:



Titulación del borato de amonio: El borato de amonio formado en el paso anterior se valora con HCl usando como indicadores de punto final una mezcla de rojo de metilo y azul de metileno ó de rojo de metilo y verde de bromocresol. La reacción correspondiente es:



- ❖ **Fósforo Disponible (P Disp).** En suelos ácidos el método empleado para esta determinación fue Bray II, que utiliza como solución extractora NH_4F 0,03N + HCL 0,1N de acuerdo a las reacciones 7 y 8.



Una vez extraído el fósforo, se procedió a su determinación por el método colorimétrico, formando un complejo del fósforo con ácido molibídico que absorbe a 660 nm. El método cloro-molibdico utiliza una solución de HCl-(NH₄)₆Mo₇O₂₄·4H₂O, que al reaccionar produce H₂MoO₄. Posteriormente este ácido molibídico reacciona con el ácido fosfórico de acuerdo con la siguiente reacción:



Este hetero compuesto incoloro [P(Mo₃O₁₀)₄] formado por reducción con ácido ascórbico en presencia de HCl que forma un compuesto de color azul que absorbe a 660 nm. El equipo utilizado en esta determinación fue el espectrofotómetro UV-VIS (Spectronic Unicam Genesys 20, USA).

- ❖ **Acidez intercambiable y Aluminio intercambiable (Ac Int y Al Int).** Se determinó mediante el método de desplazamiento, que consiste en desplazar los iones H⁺ y Al³⁺ del suelo con una solución neutra de KCl 1N. Los iones desplazados son titulables con soda en presencia de fenolftaleína. Una vez titulados estos iones quedan en forma de Al(OH₂)₅²⁺ y se valoró el Al³⁺ presente en forma hidratada de acuerdo con las siguientes reacciones:



El NaOH producido se tituló con HCl 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 de H⁺.

Se pesan 5 g de suelo previamente tamizado por malla 2 mm y se agregan 50 mL de solución KCl 1N se agita por 5 min se filtra, al filtrado se agregan 3 gotas de indicador fenolftaleína y se titula con NaOH 0.05N, se adicionan 10 mL de NaF y se titula nuevamente con HCl 0.05N.

- ❖ **Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC).** Se determina por medio de valoración volumétrica que consiste en desplazar todos los cationes del suelo y reemplazarlos por iones NH₄⁺. El suelo seco, tamizado y muy fino, se saturó con NH₄⁺. Posteriormente, se desplazaron los iones NH₄⁺ adsorbidos con NaCl, al 10 % obteniéndose NH₄Cl en solución, que se trató con formaldehído neutro. El HCl obtenido se tituló con NaOH 0,1N. La reacción muestra lo que ocurre:



Bases de cambio. Corresponden al Calcio, Magnesio Sodio y Potasio. Se determinaron en el primer extracto del tratamiento con acetato de amonio (AcONH_4) de la determinación de CIC y la cuantificación se realizó por espectrofotometría de Absorción Atómica (Thermo® serie S4SN71203, Alemania) a las longitudes de onda 422,7; 285,2; 589; 740 nm respectivamente en el laboratorio de la CRC.

Para realizar los respectivos cálculos de los demás parámetros se emplean las formulas de la Tabla 4.

Tabla 4. Formulas químicas de los análisis de las muestras

Parámetro	Fórmula
Bases de cambio	$\Sigma \text{bases } \text{Ca}^{+2} + \text{Mg}^{+2} + \text{Na}^+ + \text{K}^+$
CIC efectiva	$\Sigma \text{bases de cambio} + \text{Acidez intercambiable}$
Saturación de Bases	$\%SB = \frac{\Sigma \text{bases}}{CIC} \times 100$
Saturación de Bases Efectiva	$\%SBE = \frac{\Sigma \text{bases}}{CICE} \times 100$
Saturación de Ca	$\%SCa = \frac{\text{meqCa}}{CIC} \times 100$
Saturación de Ca Efectiva	$\%SCaE = \frac{\text{meqCa}}{CICE} \times 100$
Saturación de Mg	$\%SMg = \frac{\text{meqMg}}{CIC} \times 100$
Saturación de Mg Efectiva	$\%SMgE = \frac{\text{meqMg}}{CICE} \times 100$
Saturación de Na	$\%SNa = \frac{\text{meqNa}}{CIC} \times 100$
Saturación de Na Efectiva	$\%SNaE = \frac{\text{meqNa}}{CICE} \times 100$
Saturación de K	$\%SK = \frac{\text{meqK}}{CIC} \times 100$
Saturación de K Efectiva	$\%SKE = \frac{\text{meqK}}{CICE} \times 100$
Saturación de Al	$\%SAl = \frac{\text{meqAl}}{CIC} \times 100$
Saturación de Al Efectiva	$\%SAlE = \frac{\text{meqAl}}{CICE} \times 100$

4.2.3 Evaluación cualitativa de la presencia de alófanos en las muestras compuestas: Se realizó en las muestras compuestas en la cual se evalúa el pH del suelo en una suspensión de fluoruro de sodio (NaF) 1N en relación 1:50, para ello, se pesó 1 g de suelo, se adicione 50 mL de NaF 1N (pH=6.8) y se agito la suspensión por un minuto; por consiguiente se leyó el pH en la tercera parte superior de la suspensión exactamente a los 2 min de la adición del NaF. Un valor de pH mayor o igual a 9,4 indica la presencia de alófanos.^[69]



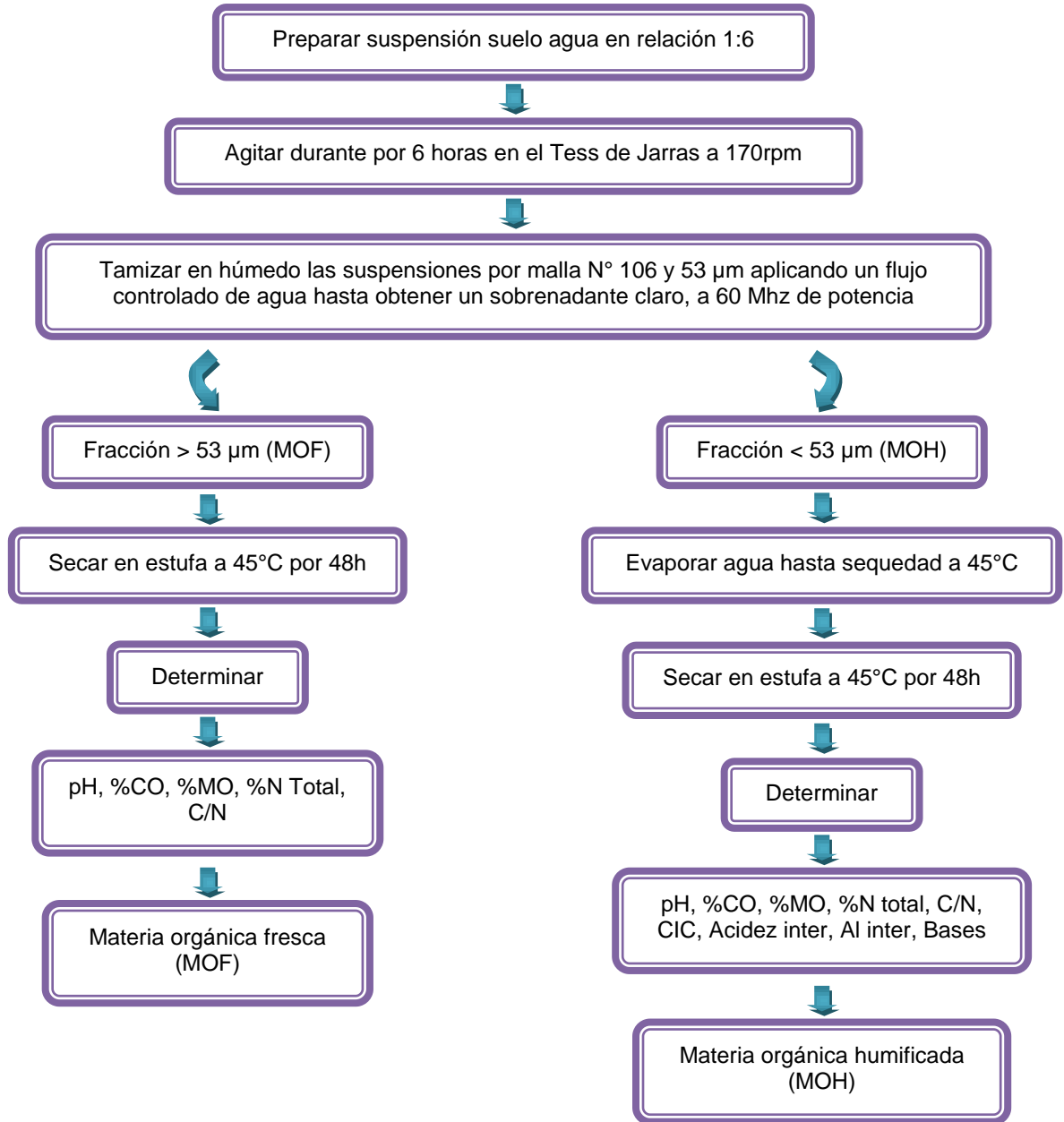
4.2.4 Caracterización de hojarasca proveniente de los suelos de bosque: Con el propósito de evaluar su contribución en la composición de la MO de estos suelos, se caracterizó la hojarasca mediante las determinaciones de la humedad higroscópica (%) por el método gravimétrico, se midió el pH por el método potenciométrico en relación suelo-agua 1:2,5, mientras que el contenido de CO (método de Walckley Black) en la determinación colorimétrica a 585 nm y el N total se determinó mediante el método Kjeldahl, mencionados anteriormente.^[68]

4.2.4.1 Evaluación del grado de mineralización de la hojarasca. Se realizó mediante la determinación de la relación C/N en cada una de las muestras de bosque.

4.2.5 Fraccionamiento de la materia orgánica: Con el objeto de evaluar las diferentes fracciones de la MOS, se separó la MOH de la MOF, empleando el método granulométrico de tamizaje húmedo con mallas comprendidas entre 53 y 106 μm . Para fraccionar las sustancias húmicas se empleó el método de extracción con soluciones básicas.^[64,70-72]

4.2.5.1 Método Granulométrico. Se fundamenta en 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 y consistió en separar por tamaño molecular la MOH y MOF; teniendo en cuenta la fracción menor de 53 μm que corresponde a la MOH y la fracción mayor de 53 μm que corresponde a MOF. Para separar dichas fracciones, se utilizó un tamizador automático (Retsch As200[®], USA) y cuyo proceso se describe en la Figura 8.

Figura 8. Diagrama de separación granulométrica de la MO



4.2.5.3 Evaluación de la tasa de mineralización de la MOS. Se realizó mediante la determinación de la relación C/N en cada una de las muestras de suelo.

4.2.5.4 Evaluación del grado de Humificación de la MOS. La evaluación del grado de humificación de la MOS se hizo de acuerdo mediante el estudio de la relación entre las fracciones MOH/MOF y la relación de humificación (RH) (Tabla 5).^[63, 71-73]

Tabla 5. Fórmulas para evaluar el grado de humificación

Parámetro	Fórmula
Relación de las fracciones de la MO	$\frac{MOH}{MOF}$
RH: Relación de Humificación	$RH = \frac{CExt}{COT} \times 100$

4.3 ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LOS RESULTADOS

Para la interpretación adecuada de los datos obtenidos, se recurre a la aplicación de un tratamiento estadístico mediante el programa SPSS versión 11.5.

Teniendo en cuenta la hipótesis y los objetivos, se identificó la variable independiente (uso de suelo), los datos se sometieron inicialmente a una prueba de normalidad (Shapiro-Wilk) y de homogeneidad de varianzas (Levene), posteriormente se aplicaron pruebas no paramétricas para las 165 muestras con las pruebas de Kruskal-Wallis, U Man Whitney y correlación de Spearman; mientras que para las muestras compuestas y hojarasca de los Bosques, se realizaron pruebas paramétricas con comparación de medias (ANOVA), Tukey y correlación de Pearson para determinar grado de asociación entre las variables.

5. RESULTADOS

5.1 CARACTERIZACIÓN DE LOS SUELOS CON DIFERENTE USO

En las Tablas 6 a 12 se muestra las propiedades del suelo en las siete unidades de muestreo para las 165 muestras correspondientes a: bosque, bosque I, bosque II, pastura I, pastura II y pastura III, cultivo; con determinaciones de: %HH, Da (g/cm^3), Textura (%Arenas, %Limos, %Arcillas), pH, %CO, %MO, %N total, C/N y P Disp (mg/Kg) y su respectiva georeferenciación. Para analizar las propiedades de estos suelos se toma como referencia los parámetros reportados por Silva para suelos colombianos.^[74]

La georeferenciación y el grado de elevación de las diferentes muestras tomadas permiten deducir que se obtuvieron unidades de muestreo homogéneas y apropiadas porque presentan ubicación y elevación semejante con desviaciones estándar y coeficientes de variación muy bajos con un máximo de 5.38 y 0.17 % respectivamente en el caso del bosque. La mayoría de las propiedades físicas y químicas evaluadas en cada unidad experimental presentan también valores de desviación estándar bajos y coeficientes de variación apropiados para un experimento observacional, en general valores inferiores al 18 %.^[75]

En forma general se puede apreciar que todas las muestras analizadas presentan las siguientes características: contenidos de humedad higroscópica superior al 15 %, altos porcentajes de CO superiores a 7,0 %, altos valores de N mayores a 0,5 %, textura Franco Arenosa, valores de densidad aparente inferior a $0,9 \text{ g/cm}^3$ e intervalos bajos de pH que corresponden a los rangos de acidez extrema, fuerte y muy fuerte. Asimismo, se encuentra una deficiencia en el contenido de P disponible en todos los suelos excepto en cultivo, para lo cual se deduce que existen diferencias en las propiedades físicas y químicas de los suelos con diferente uso y dentro de un mismo uso.

Tabla 6. Resultados de la caracterización de las muestras de bosque

Muestra	Propiedades Físicas y Químicas de los Suelos												Georeferenciación		
	%HH	Da (g/cm ³)	%Arenas	%Arcillas	%Limos	Textura	pH	%CO	%MO	%N	C/N	P Disp (mg/Kg)	X	Y	Elevación
1	15,18	0,95	77,17	6,91	15,92	Fr-Ar	5,02	5,93	10,22	0,46	12,83	7,53	76° 24' 17.3243" W	2° 26' 17.7385" N	3170 m
2	15,53	0,73	75,89	7,53	16,58	Fr-Ar	5,01	9,35	16,12	0,67	13,92	8,32	76° 24' 17.4390" W	2° 26' 17.6240" N	3167 m
3	15,18	0,95	77,17	6,91	15,92	Fr-Ar	5,02	5,93	10,22	0,46	12,83	7,53	76° 24' 17.3243" W	2° 26' 17.5095" N	3166 m
4	12,17	0,93	76,82	4,96	18,22	Fr-Ar	5,12	5,96	10,28	0,48	12,41	8,30	76° 24' 17.2097" W	2° 26' 17.3949" N	3166 m
5	12,17	0,93	76,82	4,96	18,22	Fr-Ar	5,12	5,96	10,28	0,48	12,41	8,30	76° 24' 17.2097" W	2° 26' 17.6240" N	3170 m
6	13,44	0,85	76,48	5,61	17,90	Fr-Ar	5,16	6,45	11,12	0,55	11,76	6,64	76° 24' 17.0951" W	2° 26' 17.2804" N	3166 m
7	13,44	0,85	76,48	5,61	17,90	Fr-Ar	5,16	6,45	11,12	0,55	11,76	6,64	76° 24' 17.0951" W	2° 26' 17.5095" N	3169 m
8	18,66	0,82	74,97	7,20	17,83	Fr-Ar	5,41	6,17	10,63	0,48	12,98	7,85	76° 24' 16.9804" W	2° 26' 17.1659" N	3165 m
9	19,52	0,79	76,56	7,28	16,16	Fr-Ar	5,12	7,55	13,02	0,66	11,47	7,46	76° 24' 17.0951" W	2° 26' 17.0513" N	3162 m
10	18,50	0,93	76,25	7,80	15,95	Fr-Ar	5,49	4,31	7,43	0,21	20,29	6,89	76° 24' 17.2097" W	2° 26' 17.1659" N	3162 m
11	18,20	0,89	75,11	7,16	17,73	Fr-Ar	4,95	8,95	15,42	0,59	15,19	4,98	76° 24' 17.3243" W	2° 26' 17.2804" N	3162.858 m
12	12,68	0,93	78,40	7,28	14,31	Fr-Ar	4,92	4,71	8,12	0,42	11,22	8,49	76° 24' 16.9804" W	2° 26' 17.3949" N	3169 m
13	17,96	0,92	77,01	7,14	15,84	Fr-Ar	5,24	5,31	9,16	0,43	12,45	7,47	76° 24' 16.8658" W	2° 26' 17.2804" N	3169 m
14	18,54	0,93	76,85	7,81	15,35	Fr-Ar	5,30	7,31	12,61	0,56	13,12	4,21	76° 24' 17.4390" W	2° 26' 17.3949" N	3163 m
15	19,72	0,89	74,63	7,30	18,07	Fr-Ar	4,96	7,70	13,28	0,58	13,27	7,48	76° 24' 17.5536" W	2° 26' 17.5095" N	3163 m
16	13,51	0,99	78,19	7,35	14,45	Fr-Ar	5,09	5,44	9,38	0,41	13,34	8,57	76° 24' 17.6682" W	2° 26' 17.3949" N	3160 m
17	15,95	0,91	77,49	6,99	15,52	Fr-Ar	4,41	7,91	13,63	0,64	12,38	7,14	76° 24' 17.5536" W	2° 26' 17.2804" N	3160 m
18	17,48	0,93	75,00	7,81	17,19	Fr-Ar	5,52	7,47	12,87	0,60	12,47	5,71	76° 24' 17.4390" W	2° 26' 17.1659" N	3159 m
19	17,62	0,88	82,81	7,01	10,17	Ar-Fr	4,67	11,17	19,25	0,89	12,49	5,57	76° 24' 17.3243" W	2° 26' 17.0513" N	3159 m
20	18,95	0,91	74,87	7,85	17,28	Fr-Ar	4,60	10,22	17,62	0,82	12,45	5,34	76° 24' 17.2097" W	2° 26' 16.9368" N	3158 m
21	16,32	0,92	77,26	7,07	15,68	Fr-Ar	5,20	9,52	16,41	0,85	11,15	7,48	76° 24' 17.3243" W	2° 26' 16.8223" N	3155 m
22	18,95	0,91	74,87	7,85	17,28	Fr-Ar	4,60	10,22	17,62	0,82	12,45	5,34	76° 24' 17.4390" W	2° 26' 16.9368" N	3155 m
23	18,52	0,93	75,00	7,81	17,19	Fr-Ar	4,85	8,38	14,44	0,76	10,97	5,00	76° 24' 17.5536" W	2° 26' 17.0513" N	3156 m
24	17,22	0,92	75,34	7,10	17,56	Fr-Ar	4,81	8,71	15,02	0,62	14,14	7,87	76° 24' 17.6682" W	2° 26' 17.1659" N	3156 m
25	13,94	0,95	78,27	6,75	14,98	Fr-Ar	4,92	7,61	13,13	0,60	12,74	7,12	76° 24' 17.7828" W	2° 26' 17.2804" N	3157 m
Promedio	16,37	0,90	76,63	7,00	16,37	-----	5,03	7,39	12,74	0,58	12,90	6,93	-----	-----	3162.16
S	2,47	0,06	1,72	0,84	1,76	-----	0,27	1,83	3,16	0,16	1,81	1,26	-----	-----	5,38
CV(±)	15,11	6,18	2,25	12,02	10,74	-----	5,45	24,82	24,82	27,51	14,04	18,15	-----	-----	0,17

HH: Humedad Higroscópica; Da: Densidad aparente; Fr-Ar: Franco-Arenoso; Ar-Fr: Arenoso-Franco; CO: Carbono Orgánico; MO: Materia Orgánica; N Total: Nitrógeno Total; P Disp: Fósforo disponible.

Tabla 7. Resultados de la caracterización de las muestras de bosque I

	Propiedades Físicas y Químicas de los Suelos												Georeferenciación			
	Muestra	%HH	Da (g/cm ³)	%Arenas	%Arcillas	%Limos	Textura	pH	%CO	%MO	%N	C/N	P Disp (mg/Kg)	X	Y	Elevación
Bosque I	26	18,76	0,53	74,94	5,37	19,70	Fr-Ar	5,60	7,11	12,26	0,65	10,86	4,54	76° 24' 15.7355" W	2° 26' 19.2013" N	3205 m
	27	18,32	0,50	78,75	5,34	15,91	Ar-Fr	4,70	9,34	16,10	0,91	10,30	5,93	76° 24' 15.5734" W	2° 26' 19.2013" N	3206 m
	28	17,30	0,52	75,38	4,06	20,55	Fr-Ar	5,16	13,07	22,54	1,10	11,91	9,90	76° 24' 15.4113" W	2° 26' 19.2013" N	3208 m
	29	17,54	0,57	76,52	5,29	18,19	Fr-Ar	5,07	12,96	22,34	0,93	13,90	8,06	76° 24' 15.2492" W	2° 26' 19.2013" N	3209 m
	30	18,58	0,56	75,88	5,17	18,96	Fr-Ar	4,57	11,78	20,30	0,86	13,76	6,42	76° 24' 15.0871" W	2° 26' 19.2013" N	3210 m
	31	19,06	0,64	73,00	7,86	19,15	Fr-Ar	4,34	8,76	15,09	0,72	12,10	5,99	76° 24' 14.9249" W	2° 26' 19.2013" N	3211 m
	32	18,90	0,48	78,59	5,38	16,03	Ar-Fr	4,49	12,84	22,14	1,06	12,08	7,56	76° 24' 14.7628" W	2° 26' 19.2013" N	3212 m
	33	18,56	0,64	73,15	7,20	19,65	Fr-Ar	4,98	12,57	21,67	0,96	13,14	7,53	76° 24' 14.6007" W	2° 26' 19.2013" N	3213 m
	34	17,27	0,54	74,78	8,29	16,92	Fr-Ar	5,20	11,04	19,04	0,75	14,81	11,60	76° 24' 14.4386" W	2° 26' 19.2013" N	3215 m
	35	18,51	0,51	74,90	5,99	19,11	Fr-Ar	4,76	12,03	20,74	1,17	10,25	10,84	76° 24' 14.2765" W	2° 26' 19.2013" N	3216 m
	36	18,81	0,44	78,62	5,37	16,01	Fr-Ar	4,67	14,58	25,14	1,18	12,35	8,97	76° 24' 14.2765" W	2° 26' 19.3632" N	3216 m
	37	19,01	0,62	76,71	6,62	16,67	Fr-Ar	4,86	11,49	19,81	0,81	14,23	8,36	76° 24' 14.4386" W	2° 26' 19.3632" N	3215 m
	38	18,68	0,59	78,65	7,21	14,14	Fr-Ar	4,59	9,66	16,65	0,90	10,68	6,91	76° 24' 14.6007" W	2° 26' 19.3632" N	3214 m
	39	18,64	0,57	74,97	7,20	17,82	Fr-Ar	4,67	11,01	18,98	0,69	15,96	7,06	76° 24' 14.7628" W	2° 26' 19.3632" N	3213 m
	40	18,51	0,52	76,24	5,35	18,41	Fr-Ar	4,80	13,40	23,11	0,91	14,75	6,89	76° 24' 14.9249" W	2° 26' 19.3632" N	3212 m
	41	18,92	0,50	73,05	7,23	19,73	Fr-Ar	4,95	11,36	19,59	1,35	8,43	11,05	76° 24' 15.0871" W	2° 26' 19.3632" N	3211 m
	42	18,74	0,40	74,33	5,37	20,31	Fr-Ar	4,61	13,92	24,00	1,14	12,21	7,07	76° 24' 15.2492" W	2° 26' 19.3632" N	3210 m
	43	15,67	0,53	79,41	5,17	15,42	Ar-Fr	5,33	8,19	14,11	0,57	14,26	3,61	76° 24' 15.4113" W	2° 26' 19.3632" N	3208 m
	44	18,40	0,48	73,21	8,41	18,38	Fr-Ar	5,00	13,80	23,79	1,04	13,27	7,20	76° 24' 15.5734" W	2° 26' 19.3632" N	3207 m
	45	19,33	0,54	74,42	5,35	20,23	Fr-Ar	5,22	13,11	22,59	1,02	12,81	6,32	76° 24' 15.7355" W	2° 26' 19.3632" N	3205 m
46	18,61	0,54	78,67	7,20	14,13	Fr-Ar	5,47	8,54	14,72	0,77	11,05	6,43	76° 24' 15.7355" W	2° 26' 19.0393" N	3204 m	
47	17,63	0,53	76,49	7,12	16,39	Fr-Ar	4,46	9,03	15,57	0,88	10,25	7,13	76° 24' 15.5734" W	2° 26' 19.0393" N	3205 m	
48	18,75	0,52	76,17	7,21	16,62	Fr-Ar	4,99	12,97	22,35	1,04	12,42	4,86	76° 24' 15.4113" W	2° 26' 19.0393" N	3207 m	
49	18,59	0,54	78,68	5,36	15,97	Ar-Fr	5,20	12,20	21,03	1,16	10,49	8,00	76° 24' 15.7355" W	2° 26' 18.8773" N	3203 m	
50	18,06	0,53	73,33	6,54	20,13	Fr-Ar	5,30	9,81	16,91	0,90	10,93	9,52	76° 24' 15.5734" W	2° 26' 18.8773" N	3205 m	
Promedio	18,37	0,53	75,95	6,27	17,78	-----	4,92	11,38	19,62	0,94	12,29	7,51	-----	-----	3210	
S	0,77	0,05	2,11	1,16	1,97	-----	0,34	2,05	3,54	0,19	1,81	1,98	-----	-----	4,03	
CV(±)	4,22	10,08	2,77	18,53	11,06	-----	6,81	18,03	18,03	20,15	14,75	26,43	-----	-----	0,13	

HH: Humedad Higroscópica; Da: Densidad aparente; Fr-Ar: Franco-Arenoso; Ar-Fr: Arenoso-Franco; CO: Carbono Orgánico; MO: Materia Orgánica; N Total: Nitrógeno Total; P Disp: Fósforo disponible.

Tabla 8. Resultados de la caracterización de las muestras de bosque II

	Propiedades Físicas y Químicas de los Suelos												Georeferenciación			
	Muestra	%HH	Da (g/cm ³)	%Arenas	%Arcillas	%Limos	Textura	pH	%CO	%MO	%N	C/N	P Disp (mg/Kg)	X	Y	Elevación
Bosque II	51	17,95	0,53	74,86	6,13	19,00	Fr-Ar	4,50	14,20	24,48	0,99	14,34	1,16	76° 24' 12.6972" W	2° 26' 18.5584" N	3232 m
	52	17,16	0,62	73,01	6,59	20,40	Fr-Ar	4,17	13,29	22,91	1,07	12,41	3,08	76° 24' 12.5350" W	2° 26' 18.5584" N	3234 m
	53	18,27	0,50	72,28	6,02	21,71	Fr-Ar	4,37	13,77	23,74	1,21	11,39	2,41	76° 24' 12.5350" W	2° 26' 18.8823" N	3236 m
	54	17,10	0,50	70,87	5,85	23,28	Fr-Ar	4,27	12,91	22,26	1,14	11,28	1,14	76° 24' 12.5350" W	2° 26' 19.0443" N	3235 m
	55	17,81	0,51	76,89	5,99	17,12	Fr-Ar	4,63	13,85	23,88	1,11	12,51	3,46	76° 24' 12.3730" W	2° 26' 18.7206" N	3237 m
	56	17,10	0,46	77,42	6,58	16,00	Fr-Ar	4,27	12,69	21,88	1,11	11,39	4,84	76° 24' 12.5350" W	2° 26' 18.7204" N	3235 m
	57	17,66	0,51	79,32	6,67	14,01	Fr-Ar	4,07	15,00	25,85	1,23	12,15	1,86	76° 24' 12.6972" W	2° 26' 18.7204" N	3233 m
	58	18,43	0,49	78,93	6,79	14,28	Fr-Ar	4,36	12,58	21,69	0,93	13,50	4,74	76° 24' 12.6972" W	2° 26' 19.2063" N	3232 m
	59	19,22	0,51	76,21	6,93	16,86	Fr-Ar	4,03	12,33	21,26	1,47	8,41	4,42	76° 24' 12.6972" W	2° 26' 18.8823" N	3234 m
	60	18,77	0,52	78,25	7,27	14,47	Fr-Ar	4,00	15,14	26,10	1,60	9,49	3,86	76° 24' 12.6972" W	2° 26' 19.0443" N	3233 m
	61	16,45	0,50	77,77	5,76	16,47	Fr-Ar	4,05	15,58	26,85	1,34	11,65	3,93	76° 24' 12.5350" W	2° 26' 19.2063" N	3234 m
	62	19,43	0,56	82,27	4,25	13,48	Ar-Fr	3,90	14,56	25,11	1,25	11,65	3,53	76° 24' 12.3730" W	2° 26' 19.0445" N	3237 m
	63	18,07	0,51	82,09	5,99	11,92	Ar-Fr	4,39	12,51	21,57	1,03	12,19	4,90	76° 24' 12.2106" W	2° 26' 18.9633" N	3239 m
	64	18,78	0,55	76,47	6,85	16,68	Fr-Ar	4,35	11,80	20,34	1,08	10,91	4,58	76° 24' 12.2106" W	2° 26' 18.8014" N	3240 m
	65	18,44	0,51	74,41	6,80	18,79	Fr-Ar	4,65	11,02	18,99	0,87	12,72	1,88	76° 24' 12.3730" W	2° 26' 18.8825" N	3238 m
Promedio	18,04	0,52	76,74	6,30	16,97	-----	4,27	13,41	23,13	1,16	11,73	3,32	-----			3235,27
S	0,85	0,04	3,30	0,73	3,19	-----	0,23	1,32	2,27	0,20	1,45	1,33	-----			2,49
CV(±)	4,69	6,94	4,30	11,58	18,82	-----	5,36	9,81	9,81	16,84	12,39	40,14	-----			0,08

HH: Humedad Higroscópica; Da: Densidad aparente; Fr-Ar: Franco-Arenoso; Ar-Fr: Arenoso-Franco; CO: Carbono Orgánico; MO: Materia Orgánica; N Total: Nitrógeno Total; P Disp: Fósforo disponible.

Tabla 9. Resultados de la caracterización de las muestras de pastura I

	Propiedades Físicas y Químicas de los Suelos												Georeferenciación			
	Muestra	%HH	Da (g/cm ³)	%Arenas	%Arcillas	%Limos	Textura	pH	%CO	%MO	%N	C/N	P Disp (mg/Kg)	X	Y	Elevación
Pastura I	66	16,07	0,77	68,97	8,32	22,71	Fr-Ar	4,56	9,87	17,01	0,79	12,56	6,67	76° 24' 11.3243" W	2° 26' 27.7385" N	3106,8 m
	67	14,11	0,69	80,53	6,59	12,88	Ar-Fr	4,77	10,62	18,31	0,73	14,53	7,87	76° 24' 11.2097" W	2° 26' 27.6240" N	3105,6 m
	68	16,87	0,81	73,61	7,26	19,14	Fr-Ar	4,59	7,84	13,52	0,63	12,40	5,95	76° 24' 11.0951" W	2° 26' 27.5095" N	3105,4 m
	69	14,34	0,73	74,30	10,03	15,67	Fr-Ar	4,91	7,66	13,20	0,66	11,59	5,92	76° 24' 11.9804" W	2° 26' 27.3949" N	3105,2 m
	70	18,22	0,74	73,31	9,86	16,83	Fr-Ar	4,65	8,11	13,98	0,58	13,99	6,37	76° 24' 11.8658" W	2° 26' 27.2804" N	3104,7 m
	71	17,49	0,56	62,75	7,14	30,12	Fr-Ar	5,10	7,58	13,06	0,56	13,55	5,84	76° 24' 11.4390" W	2° 26' 27.6240" N	3104,4 m
	72	13,70	0,67	70,65	5,85	23,50	Fr-Ar	4,66	7,91	13,64	0,64	12,33	9,03	76° 24' 11.3243" W	2° 26' 27.5095" N	3104,9 m
	73	17,62	0,71	69,45	11,92	18,63	Fr-Ar	4,23	8,02	13,83	0,96	8,35	9,15	76° 24' 11.2097" W	2° 26' 27.3949" N	3106,4 m
	74	16,33	0,58	77,35	4,80	17,85	Ar-Fr	4,48	12,04	20,75	0,91	13,25	6,84	76° 24' 11.0951" W	2° 26' 27.2804" N	3106,4 m
	75	15,63	0,59	61,97	15,24	22,79	Fr-Ar	4,44	7,82	13,48	0,78	10,01	8,01	76° 24' 11.9804" W	2° 26' 27.1659" N	3106,4 m
	76	15,71	0,61	73,45	10,36	16,19	Fr-Ar	4,48	8,90	15,34	0,80	11,14	7,71	76° 24' 11.5536" W	2° 26' 27.5095" N	3105,2 m
	77	17,51	0,66	71,71	6,54	21,75	Fr-Ar	4,85	9,81	16,91	0,85	11,48	8,82	76° 24' 11.4390" W	2° 26' 27.3949" N	3103,7 m
	78	14,38	0,75	72,23	5,95	21,82	Fr-Ar	4,95	9,25	15,95	0,94	9,88	7,14	76° 24' 11.3243" W	2° 26' 27.2804" N	3103,2 m
	79	12,83	0,76	76,50	5,74	17,77	Fr-Ar	4,35	7,63	13,16	0,72	10,54	6,86	76° 24' 11.2097" W	2° 26' 27.1659" N	3103 m
	80	14,37	0,67	71,90	6,86	21,24	Fr-Ar	5,35	5,77	9,95	0,37	15,42	6,83	76° 24' 11.0951" W	2° 26' 27.0513" N	3102,8 m
	81	16,49	0,68	70,09	6,25	23,66	Fr-Ar	4,39	7,56	13,03	0,53	14,31	7,01	76° 24' 11.6682" W	2° 26' 27.3949" N	3100,6 m
	82	17,60	0,60	69,64	11,51	18,85	Fr-Ar	4,89	8,20	14,14	0,65	12,59	6,16	76° 24' 11.7828" W	2° 26' 27.2804" N	3098 m
	83	13,42	0,59	70,95	12,17	16,87	Fr-Ar	4,46	10,78	18,58	0,82	13,07	8,55	76° 24' 11.5536" W	2° 26' 27.2804" N	3099,6 m
	84	13,42	0,58	75,00	9,48	15,52	Fr-Ar	5,27	9,86	16,99	0,78	12,57	8,70	76° 24' 11.6682" W	2° 26' 27.1659" N	3099,2 m
	85	14,11	0,65	74,89	9,52	15,59	Fr-Ar	4,91	8,62	14,86	0,93	9,26	8,47	76° 24' 11.4390" W	2° 26' 27.1659" N	3100,6 m
86	14,12	0,62	76,92	9,52	13,56	Fr-Ar	5,21	8,83	15,22	0,83	10,61	8,77	76° 24' 11.5536" W	2° 26' 27.0513" N	3098 m	
87	17,25	0,69	71,84	9,68	18,48	Fr-Ar	4,95	9,54	16,45	0,78	12,18	7,85	76° 24' 11.3243" W	2° 26' 27.1613" N	3099,2 m	
88	15,52	0,59	83,16	8,43	8,41	Ar-Fr	4,44	11,78	20,30	1,03	11,48	7,85	76° 24' 11.2097" W	2° 26' 27.9368" N	3099,4 m	
89	15,23	0,64	74,23	9,77	16,00	Fr-Ar	4,58	8,49	14,64	0,80	10,68	8,43	76° 24' 11.3243" W	2° 26' 27.8223" N	3099,6 m	
90	15,02	0,64	76,43	5,57	18,00	Fr-Ar	4,84	7,43	12,81	0,62	12,00	5,52	76° 24' 17.4390" W	2° 26' 27.9368" N	3100,8 m	
Promedio	15,49	0,66	72,87	8,57	18,55	-----	4,73	8,80	15,16	0,75	11,99	7,45	-----	-----	3102,76	
S±)	1,58	0,07	4,65	2,54	4,35	-----	0,30	1,47	2,53	0,15	1,71	1,13	-----	-----	2,96	
CV(10,23	10,32	6,38	29,67	23,43	-----	6,42	16,67	16,67	20,47	14,29	15,10	-----	-----	0,09	

HH: Humedad Higroscópica; Da: Densidad aparente; Fr-Ar: Franco-Arenoso; Ar-Fr: Arenoso-Franco; CO: Carbono Orgánico; MO: Materia Orgánica; N Total: Nitrógeno Total; P Disp: Fósforo disponible.

Tabla 10. Resultados de la caracterización de las muestras de pastura II

Muestra	Propiedades Físicas y Químicas de los Suelos												Georeferenciación		
	%HH	Da (g/cm ³)	%Arenas	%Arcillas	%Limos	Textura	pH	%CO	%MO	%N	C/N	P Disp (mg/Kg)	X	Y	Elevación
91	18,45	0,81	76,15	9,56	14,28	Fr-Ar	5,30	8,75	15,09	1,03	8,49	6,70	76° 24' 13.6682" W	2° 26' 28.1659" N	3109,5 m
92	18,03	0,58	74,16	10,95	14,88	Fr-Ar	5,17	10,34	17,83	1,01	10,24	6,82	76° 24' 13.4390" W	2° 26' 28.9368" N	3109 m
93	19,62	0,59	74,08	10,08	15,84	Fr-Ar	5,06	9,96	17,17	1,19	8,37	7,12	76° 24' 13.0951" W	2° 26' 28.5095" N	3109,2 m
94	19,45	0,72	83,26	3,64	13,10	Ar-Fr	4,73	10,92	18,82	1,14	9,57	6,79	76° 24' 12.9804" W	2° 26' 28.3949" N	3106,4 m
95	19,66	0,81	71,29	6,24	22,47	Fr-Ar	4,91	10,69	18,42	1,17	9,11	6,64	76° 24' 13.0951" W	2° 26' 28.2804" N	3106,8 m
96	19,50	0,55	73,21	9,81	16,97	Fr-Ar	5,14	10,80	18,62	1,25	8,66	7,91	76° 24' 13.2097" W	2° 26' 28.6240" N	3104,9 m
97	19,70	0,64	79,51	9,71	10,77	Fr-Ar	5,04	8,72	15,04	0,99	8,81	6,80	76° 24' 13.3243" W	2° 26' 28.8223" N	3105,4 m
98	19,92	0,56	77,25	10,07	12,67	Fr-Ar	4,96	10,77	18,57	1,17	9,18	6,98	76° 24' 13.2097" W	2° 26' 28.3949" N	3105,4 m
99	19,79	0,56	79,94	9,51	10,55	Ar-Fr	4,81	9,09	15,68	1,06	8,57	7,30	76° 24' 13.2097" W	2° 26' 28.1659" N	3105,4 m
100	18,88	0,68	81,22	5,87	12,92	Ar-Fr	5,10	9,24	15,93	1,07	8,66	7,53	76° 24' 12.9804" W	2° 26' 28.1659" N	3104,4 m
101	19,78	0,51	84,43	6,42	9,15	Ar-Fr	4,84	10,68	18,41	1,09	9,80	5,85	76° 24' 13.5536" W	2° 26' 28.5095" N	3107,3 m
102	19,86	0,64	82,08	6,37	11,55	Ar-Fr	4,85	10,98	18,92	1,13	9,76	5,85	76° 24' 13.4390" W	2° 26' 28.3949" N	3106,1 m
103	18,90	0,75	79,93	6,27	13,80	Ar-Fr	4,99	9,26	15,97	0,95	9,70	6,42	76° 24' 13.3243" W	2° 26' 28.2804" N	3105,6 m
104	19,03	0,62	76,23	6,39	17,38	Fr-Ar	4,87	8,94	15,42	1,03	8,71	6,43	76° 24' 13.3243" W	2° 26' 28.5095" N	3105,2 m
105	18,38	0,64	76,19	8,80	15,01	Fr-Ar	5,00	9,37	16,15	0,92	10,20	6,70	76° 24' 13.4390" W	2° 26' 28.6240" N	3103,5 m
106	19,28	0,48	69,87	9,89	20,25	Fr-Ar	4,76	8,94	15,42	1,05	8,49	6,76	76° 24' 13.6682" W	2° 26' 28.3949" N	3103,2 m
107	18,62	0,67	73,79	8,85	17,36	Fr-Ar	4,92	9,06	15,62	0,93	9,71	6,24	76° 24' 13.7828" W	2° 26' 28.2804" N	3101,8 m
108	18,80	0,68	71,28	6,39	22,34	Fr-Ar	4,71	7,44	12,83	0,67	11,17	7,21	76° 24' 13.5536" W	2° 26' 28.2804" N	3104,4 m
109	19,16	0,55	78,99	9,96	11,05	Fr-Ar	4,91	9,39	16,19	1,02	9,17	7,72	76° 24' 13.3243" W	2° 26' 28.7385" N	3105,6 m
110	18,94	0,52	82,30	7,10	10,59	Ar-Fr	4,97	9,79	16,87	1,22	8,01	7,54	76° 24' 13.4390" W	2° 26' 28.1659" N	3104,9 m
111	18,54	0,58	73,82	8,84	17,34	Fr-Ar	5,26	8,76	15,10	1,14	7,71	7,50	76° 24' 13.5536" W	2° 26' 28.0513" N	3106,1 m
112	19,92	0,65	81,40	7,47	11,13	Ar-Fr	5,12	9,60	16,55	1,14	8,38	6,02	76° 24' 13.3243" W	2° 26' 28.0513" N	3105,6 m
113	19,13	0,62	78,27	10,30	11,43	Fr-Ar	4,76	10,72	18,49	1,14	9,38	9,95	76° 24' 13.2097" W	2° 26' 28.9368" N	3104,4 m
114	19,73	0,75	76,41	7,16	16,43	Fr-Ar	5,20	8,65	14,91	0,90	9,59	7,77	76° 24' 13.8658" W	2° 26' 28.2804" N	3104,2 m
115	19,19	0,56	83,37	6,68	9,95	Ar-Fr	4,91	9,43	16,26	0,99	9,56	6,76	76° 24' 13.0951" W	2° 26' 28.0513" N	3101,6 m
Promedio	19,21	0,63	77,54	8,09	14,37	-----	4,97	9,61	16,57	1,06	9,16	7,01	-----	-----	3105,44
S	0,54	0,09	4,17	1,90	3,75	-----	0,17	0,92	1,59	0,13	0,79	0,84	-----	-----	1,97
CV(±)	2,82	14,31	5,38	23,45	26,12	-----	3,34	9,57	9,57	11,89	8,61	12,02	-----	-----	0,06

HH: Humedad Higroscópica; Da: Densidad aparente; Fr-Ar: Franco-Arenoso; Ar-Fr: Arenoso-Franco; CO: Carbono Orgánico; MO: Materia Orgánica; N Total: Nitrógeno Total; P Disp: Fósforo disponible.

Tabla 11. Resultados de la caracterización de las muestras de pastura III

Muestra	Propiedades Físicas y Químicas de los Suelos												Georeferenciación		
	%HH	Da (g/cm ³)	%Arenas	%Arcillas	%Limos	Textura	pH	%CO	%MO	%N	C/N	P Disp (mg/Kg)	X	Y	Elevación
116	19,19	0,59	75,61	9,95	14,44	Fr-Ar	5,38	8,42	14,51	0,93	9,08	5,35	76° 24' 15.6682" W	2° 26' 28.6659" N	3080,4 m
117	18,65	0,62	76,86	9,44	13,70	Fr-Ar	5,30	9,95	17,16	0,94	10,60	6,74	76° 24' 15.4390" W	2° 26' 28.9368" N	3080,6 m
118	19,42	0,62	80,20	4,58	15,22	Ar-Fr	5,14	10,62	18,31	1,01	10,55	6,17	76° 24' 15.0951" W	2° 26' 28.4095" N	3076,6 m
119	18,14	0,58	69,61	11,73	18,66	Fr-Ar	5,23	9,36	16,14	1,04	9,01	6,40	76° 24' 14.9804" W	2° 26' 28.3949" N	3076,3 m
120	19,37	0,60	77,91	9,01	13,07	Fr-Ar	5,13	11,64	20,07	1,16	10,00	6,81	76° 24' 15.0951" W	2° 26' 28.3804" N	3076,1 m
121	19,16	0,59	77,18	9,31	13,51	Fr-Ar	5,30	10,88	18,75	1,08	10,11	7,28	76° 24' 15.2097" W	2° 26' 28.7240" N	3075,4m
122	19,20	0,69	75,74	9,90	14,36	Fr-Ar	5,20	11,22	19,35	1,08	10,42	8,08	76° 24' 15.3243" W	2° 26' 28.6223" N	3074,2m
123	17,87	0,65	76,49	8,69	14,82	Fr-Ar	4,83	9,73	16,77	1,11	8,75	6,22	76° 24' 15.2097" W	2° 26' 28.3949" N	3073,9 m
124	18,58	0,59	76,08	8,84	15,08	Fr-Ar	5,44	10,46	18,04	0,90	11,67	6,90	76° 24' 15.2097" W	2° 26' 28.2659" N	3075,1 m
125	19,44	0,59	74,49	10,41	15,10	Fr-Ar	5,07	11,80	20,34	1,11	10,65	8,27	76° 24' 14.9804" W	2° 26' 28.3659" N	3076,1 m
126	19,47	0,57	76,03	8,11	15,86	Fr-Ar	5,24	11,04	19,03	0,97	11,32	10,20	76° 24' 15.5536" W	2° 26' 28.6095" N	3076,1 m
127	19,07	0,56	81,48	4,88	13,64	Ar-Fr	5,33	10,05	17,32	0,97	10,32	8,23	76° 24' 15.4390" W	2° 26' 28.2949" N	3075,4 m
128	18,77	0,57	81,27	7,36	11,37	Ar-Fr	5,25	9,27	15,97	0,85	10,89	8,50	76° 24' 15.3243" W	2° 26' 28.7804" N	3075,4 m
129	18,11	0,57	76,35	8,74	14,91	Fr-Ar	5,25	10,37	17,87	1,13	9,17	7,49	76°24' 15.3243" W	2° 26' 28.5095" N	3075,6 m
130	15,62	0,62	79,83	10,34	9,83	Fr-Ar	5,22	8,98	15,49	0,99	9,09	9,29	76° 24' 15.4390" W	2° 26' 28.9240" N	3075,1 m
131	18,07	0,56	75,71	9,91	14,38	Fr-Ar	5,22	10,76	18,54	1,01	10,61	8,45	76° 24' 15.6682" W	2° 26' 28.3949" N	3072,7 m
132	19,80	0,60	78,88	7,77	13,36	Fr-Ar	5,28	10,74	18,52	1,04	10,32	7,33	76° 24' 15.7828" W	2° 26' 28.6804" N	3073 m
133	19,25	0,55	77,98	8,99	13,04	Fr-Ar	5,24	9,91	17,08	0,84	11,83	7,45	76° 24' 15.5536" W	2° 26' 28.5804" N	3073 m
134	18,30	0,54	78,22	8,89	12,89	Fr-Ar	5,15	10,18	17,54	1,08	9,42	7,98	76° 24' 15.3243" W	2° 26' 28.7365" N	3072,2 m
135	18,38	0,60	78,45	7,29	14,26	Fr-Ar	5,27	10,29	17,73	0,94	10,98	6,56	76° 24' 15.4390" W	2° 26' 28.1659" N	3072,2 m
136	16,16	0,69	72,91	10,57	16,52	Fr-Ar	4,83	9,24	15,93	1,08	8,55	7,64	76° 24' 15.5536" W	2° 26' 28.3513" N	3073 m
137	17,28	0,57	81,94	7,10	10,96	Ar-Fr	4,92	9,08	15,65	1,01	8,95	8,52	76° 24' 15.3243" W	2° 26' 28.6513" N	3074,2 m
138	19,31	0,60	77,94	9,00	13,06	Fr-Ar	5,12	9,77	16,84	1,03	9,49	6,97	76° 24' 15.2097" W	2° 26' 28.3368" N	3075,1 m
139	19,73	0,74	77,57	10,63	11,79	Fr-Ar	5,23	10,49	18,08	1,05	10,02	7,98	76° 24' 15.8658" W	2° 26' 28.4804" N	3075,6 m
140	17,80	0,60	76,53	8,67	14,80	Fr-Ar	5,20	8,97	15,47	1,03	8,69	7,00	76°24' 15.0951" W	2° 26' 28.0513" N	3074,2 m
Promedio	18,57	0,60	77,25	8,81	13,94	-----	5,19	10,13	17,46	1,01	10,02	7,51	-----	-----	3075.10
S	1,05	0,05	2,70	1,67	1,84	-----	0,15	0,87	1,50	0,08	0,96	1,07	-----	-----	2,10
CV(±)	5,63	7,88	3,50	18,92	13,19	-----	2,87	8,60	8,60	8,26	9,54	14,26	-----	-----	0,07

HH: Humedad Higroscópica; Da: Densidad aparente; Fr-Ar: Franco-Arenoso; Ar-Fr: Arenoso-Franco; CO: Carbono Orgánico; MO: Materia Orgánica; N Total: Nitrógeno Total; P Disp: Fósforo disponible.

Tabla 12. Resultados de la caracterización de las muestras de cultivo

	Propiedades Físicas y Químicas de los Suelos												Georeferenciación			
	Muestra	%HH	Da (g/cm ³)	%Arenas	%Arcillas	%Limos	Textura	pH	%CO	%MO	%N	C/N	P Disp (mg/Kg)	X	Y	Elevación
Cultivo	141	13,36	0,67	76,78	10,22	13,00	Fr-Ar	5,30	10,99	18,95	0,78	14,02	96,13	76° 25' 2.1908" W	2° 26' 57.0996" N	2853 m
	142	10,99	0,70	73,78	10,22	16,00	Fr-Ar	5,08	11,79	20,33	0,87	13,49	90,75	76° 25' 2.0762" W	2° 26' 57.2141" N	2853 m
	143	16,74	0,76	76,77	10,22	13,00	Fr-Ar	5,27	10,07	17,37	0,87	11,53	85,64	76° 25' 2.1908" W	2° 26' 57.3286" N	2852 m
	144	15,93	0,64	76,78	7,42	15,80	Fr-Ar	5,17	9,50	16,39	0,86	11,04	108,41	76° 25' 2.3054" W	2° 26' 57.2141" N	2852 m
	145	16,26	0,69	73,78	8,22	18,00	Fr-Ar	5,15	10,79	18,60	1,13	9,58	40,07	76° 25' 1.9615" W	2° 26' 57.3286" N	2853 m
	146	13,62	0,58	73,78	10,22	16,00	Fr-Ar	5,22	10,14	17,48	1,05	9,68	79,45	76° 25' 2.0762" W	2° 26' 57.4432" N	2852 m
	147	18,14	0,70	64,55	11,99	23,46	Fr-Ar	4,95	11,89	20,50	1,00	11,94	69,56	76° 25' 1.8469" W	2° 26' 57.4432" N	2853 m
	148	15,55	0,66	73,78	7,22	19,00	Fr-Ar	5,19	11,41	19,66	0,95	11,97	80,76	76° 25' 1.9615" W	2° 26' 57.5577" N	2852 m
	149	17,25	0,78	76,78	6,22	17,00	Fr-Ar	5,09	12,29	21,20	1,10	11,22	42,34	76° 25' 1.7323" W	2° 26' 57.5577" N	2853 m
	150	17,08	0,73	76,78	6,22	17,00	Fr-Ar	4,95	11,63	20,04	1,05	11,03	75,29	76° 25' 1.8469" W	2° 26' 57.6722" N	2852 m
	151	18,61	0,484	69,78	10,22	20,00	Fr-Ar	4,67	12,36	21,31	0,69	17,86	44,51	76° 25' 1.9615" W	2° 26' 57.7868" N	2852 m
	152	15,92	0,61	69,78	10,22	20,00	Fr-Ar	4,84	9,94	17,14	1,04	9,54	50,48	76° 25' 2.0762" W	2° 26' 57.6722" N	2852 m
	153	17,30	0,76	76,78	10,22	13,00	Fr-Ar	4,87	10,83	18,68	1,13	9,57	68,86	76° 25' 2.0762" W	2° 26' 57.9013" N	2852 m
	154	14,97	0,75	76,78	6,22	17,00	Fr-Ar	5,29	7,40	12,75	0,98	7,52	81,59	76° 25' 2.1908" W	2° 26' 57.7868" N	2852 m
	155	19,11	0,69	73,78	10,42	15,80	Fr-Ar	4,67	8,76	15,11	0,96	9,17	25,38	76° 25' 2.1908" W	2° 26' 58.0158" N	2852 m
156	17,24	0,68	73,78	10,22	16,00	Fr-Ar	4,72	8,79	15,15	0,92	9,51	22,48	76° 25' 2.3054" W	2° 26' 57.9013" N	2852 m	
157	15,42	0,67	79,78	7,42	12,80	Fr-Ar	4,86	8,46	14,58	0,64	13,23	47,03	76° 25' 2.4201" W	2° 26' 57.7868" N	2851 m	
158	15,69	0,80	73,78	10,22	16,00	Fr-Ar	4,64	8,58	14,79	0,80	10,75	46,64	76° 25' 2.3054" W	2° 26' 57.6722" N	2851 m	
159	18,07	0,75	76,78	10,22	13,00	Fr-Ar	5,10	9,66	16,65	1,04	9,28	67,89	76° 25' 2.1908" W	2° 26' 57.5577" N	2851 m	
160	14,59	0,55	69,63	9,52	20,85	Fr-Ar	4,92	8,62	14,86	0,73	11,83	125,60	76° 25' 2.3054" W	2° 26' 57.4432" N	2851 m	
161	15,40	0,60	73,78	11,22	15,00	Fr-Ar	4,70	7,42	12,80	0,92	8,06	74,65	76° 25' 2.4201" W	2° 26' 57.3286" N	2851 m	
162	13,80	0,85	76,81	10,21	12,98	Fr-Ar	4,92	7,12	12,28	0,74	9,64	78,61	76° 25' 2.5347" W	2° 26' 57.4432" N	2851 m	
163	18,65	0,72	73,78	10,22	16,00	Fr-Ar	5,06	8,40	14,49	0,84	10,05	58,89	76° 25' 2.4201" W	2° 26' 57.5577" N	2851 m	
164	16,27	0,83	73,78	10,22	16,00	Fr-Ar	4,93	7,19	12,39	0,86	8,32	47,32	76° 25' 2.5347" W	2° 26' 57.6722" N	2850 m	
165	16,20	0,85	73,78	10,22	16,00	Fr-Ar	4,83	7,83	13,49	0,66	11,89	58,77	76° 25' 2.6493" W	2° 26' 57.5577" N	2850 m	
Prom	16,09	0,70	74,25	9,41	16,35	-----	4,98	9,68	16,68	0,90	10,87	66,68	-----	-----	2852	
S (±)	1,89	0,09	3,20	1,64	2,74	-----	0,21	1,69	2,91	0,15	2,21	24,91	-----	-----	0.88	
CV	11,73	13,04	4,31	17,47	16,78	-----	4,15	17,47	17,47	16,09	20,38	37,36	-----	-----	0.03	

HH: Humedad Higroscópica; Da: Densidad aparente; Fr-Ar: Franco-Arenoso; CO: Carbono Orgánico; MO: Materia Orgánica; N Total: Nitrógeno Total; P Disp: Fósforo disponible.

5.1.1 Influencia del cambio de uso de suelo en las propiedades físicas y químicas de suelos: Con el propósito de saber si el uso de suelo influye en las propiedades físicas y químicas de los suelos, los datos obtenidos se someten a pruebas estadísticas; inicialmente a la prueba de normalidad de **Shapiro-Will** considerando dos hipótesis: **Hipótesis Nula (Ho):** Los datos se ajustan a una distribución normal e **Hipótesis Alternativa (Ha):** Los datos no se ajustan a una distribución normal. Por ello, si la significancia es superior a 0,05 se acepta la hipótesis nula, por lo tanto los datos se ajustan a la normalidad; si la significancia es inferior a 0,05 indica que no hay ajuste a la normalidad y se acepta la hipótesis alternativa. En los resultados obtenidos no todas las variables se ajustan a la normalidad ($p < 0,05$) (Anexo B Tabla 1) y no existe homogeneidad de varianzas de manera que se aplican pruebas no paramétricas: **Kruskal-Wallis, U Man Whitney y Correlación de Spearman.**

La prueba de **Kruskal-Wallis** relacionada en la Tabla 13 indica que existen diferencias altamente significativas entre las propiedades de los suelos con diferente uso.

Tabla 13. Prueba de Kruskal-Wallis para las propiedades físicas y químicas de las muestras de suelo con diferente uso (Estadísticos de contraste^{a,b})

	HH (%)	Da (g/cm ³)	Arenas (%)	Arcillas (%)	Limos (%)	pH	P Disp (mg/Kg)	CO (%)	MO (%)	N (%)	C/N
Chi-cuadrado	85,460	112,248	30,715	56,871	43,690	65,946	93,663	78,154	78,159	93,695	75,708
Gl	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6
Sig. asintót.	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000

a Prueba de Kruskal-Wallis

b Variable de agrupación: Uso de Suelo

Para saber entre cuáles usos y propiedades está la diferencia, se aplicó la prueba de **U Mann Whitney** cuyos resultados se muestran en Anexo B (Tablas 3). En la Tabla 14 se resumen los resultados de las comparaciones de las propiedades de los diferentes usos de la prueba ante mencionada.

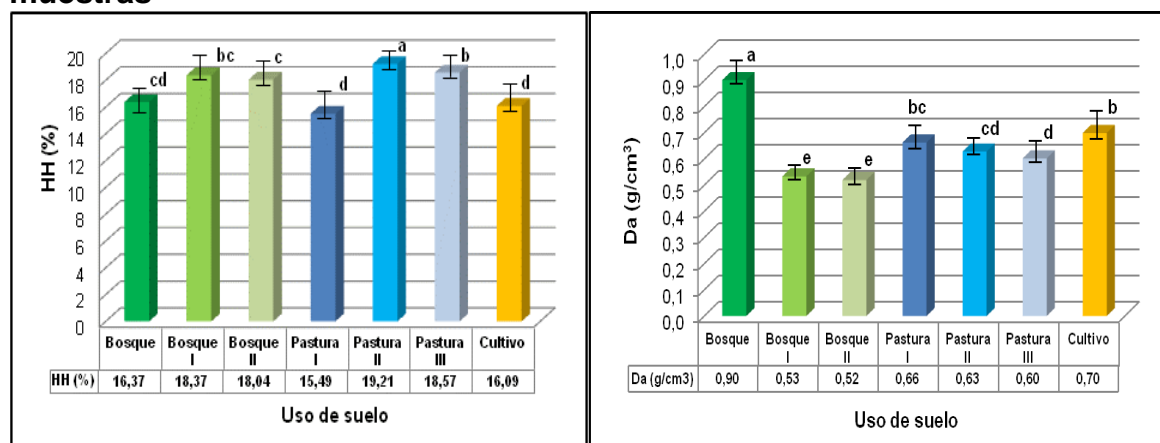
Tabla 14. Comparación de promedios de las propiedades físicas y químicas de las muestras de suelos con diferente uso (Prueba de U Man Whitney)

	Bosque	Bosque I	Bosque II	Pastura I	Pastura II	Pastura III	Cultivo
HH (%)	16,37 ^{cd}	18,37 ^{bc}	18,04 ^c	15,49 ^d	19,21 ^a	18,57 ^b	16,09 ^d
Da (g/cm³)	0,90 ^a	0,53 ^e	0,52 ^e	0,66 ^{bc}	0,63 ^{cd}	0,60 ^d	0,70 ^b
Arenas (%)	76,63 ^{ab}	75,95 ^{abc}	76,74 ^{ab}	72,87 ^d	77,54 ^a	77,25 ^{ab}	74,25 ^{cd}
Arcillas (%)	7,00 ^c	6,27 ^d	6,30 ^d	8,57 ^{bc}	8,09 ^{bc}	8,80 ^{ab}	9,41 ^a
Limos (%)	16,37 ^{cd}	17,78 ^{ab}	16,97 ^{abc}	18,55 ^a	14,37 ^e	13,94 ^e	16,35 ^d
pH	5,03 ^b	4,92 ^b	4,27 ^d	4,73 ^c	4,97 ^b	5,19 ^a	4,98 ^b
P Disp (mg/Kg)	6,93 ^b	7,51 ^b	3,32 ^c	7,45 ^b	7,01 ^b	7,51 ^b	66,68 ^a
CO (%)	7,39 ^e	11,38 ^b	13,41 ^a	8,80 ^d	9,61 ^c	10,13 ^c	9,68 ^{cd}
MO (%)	12,74 ^e	19,62 ^b	23,13 ^a	15,16 ^d	16,57 ^c	17,46 ^c	16,68 ^{cd}
N Total (%)	0,58 ^e	0,94 ^{bc}	1,16 ^a	0,75 ^d	1,06 ^a	1,01 ^b	0,90 ^c

HH: Humedad Higroscópica; Da: Densidad aparente; P Disp: Fósforo disponible; CO: Carbono Orgánico; MO: Materia Orgánica; N Total: Nitrógeno Total. Letras iguales en forma horizontal no difieren significativamente ($p>0,05$).

En la Figura 9, 10, 11, 17 y 18 se relacionan los histogramas correspondientes de las propiedades fisicoquímicas de cada una de las muestras, con sus correspondientes resultados estadísticos.

Figura 9. Promedios de la humedad higroscópica y densidad aparente en las muestras



La **humedad higroscópica** hace referencia al agua no asimilable, fuertemente retenida sobre partículas del suelo por fuerzas de adhesión superficial: Iones adheridos intensamente en suelo formando de 15 a 20 moléculas de espesor.^[74] En la Figura 9 y Tabla 14 se observan diferencias significativas entre los valores

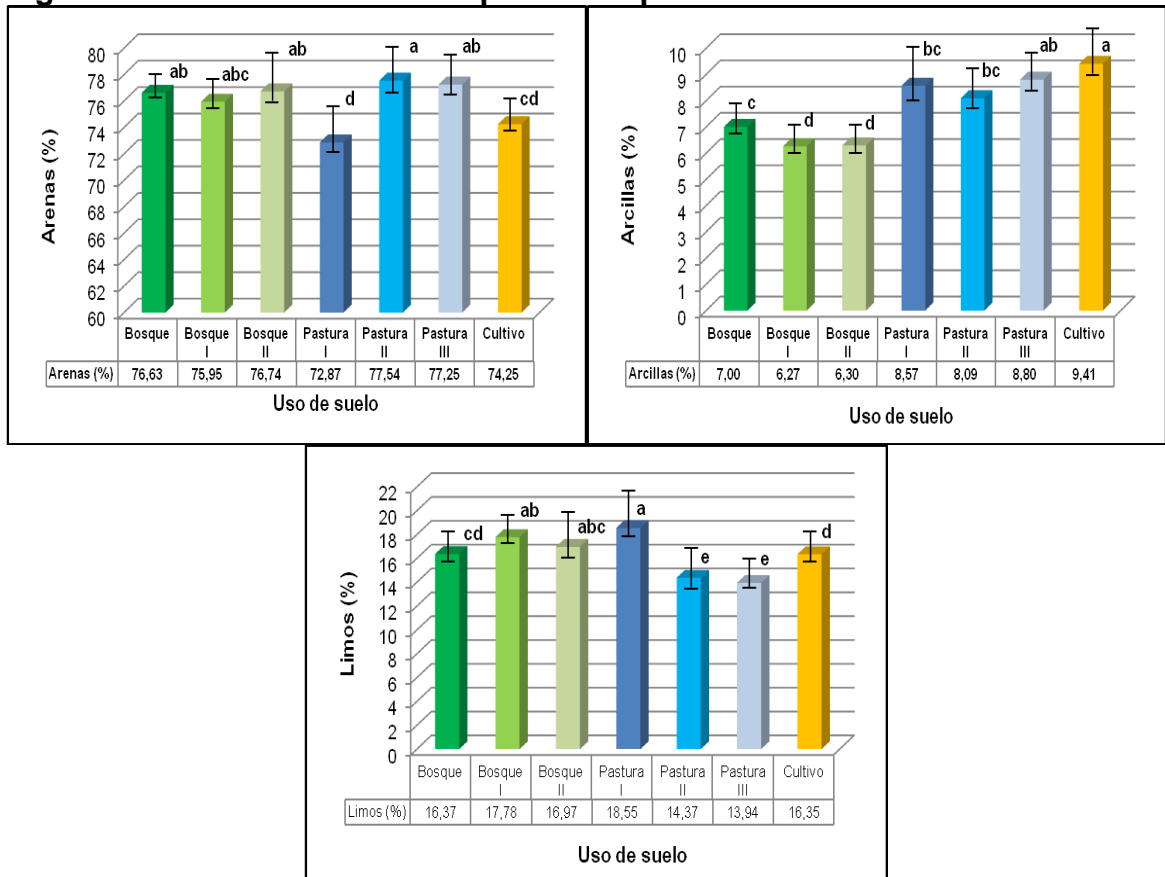
de humedad de los diferentes usos de suelo y dentro del mismo uso, reflejando composición química diferente. No existe un comportamiento regular dentro de cada uso, la humedad de pastura II es significativamente superior a todas las demás, se podría inferir que en este mayor valor de humedad influye más la cantidad y tipo de arcillas que retienen agua por adhesión o por cohesión sobre sus láminas. En este suelo se encuentran arcillas tipo 1:1 pero a diferencia de los demás usos existe allí la cristobalita lámina tetragonal (SiO_2) que puede influir en esta retención de humedad. El coeficiente de correlación de Spearman con valores bajos; negativo y altamente significativo (-0,316**) entre la HH y Da, y positivo y altamente significativo con MO (0.321**) y arenas (0.208**) confirma la influencia tanto de la fracción mineral como de la fracción orgánica en el agua fuertemente retenida en estos suelos. Los suelos de cultivo, pastura I y bosque tiene los menores valores de HH y a su vez presentan los mayores valores de Da, puesto que entre mayor número de poros (microporos) exista en el suelo habrá mayor volumen y mayor retención de agua dentro de sus partículas coloidales.^[74]

Con respecto a la Da (Figura 9 y Tabla 14-15), se puede deducir una correlación negativa y altamente significativa (-0,612**) con el contenido de CO y MO, mostrando la influencia de la MO sobre el tamaño de poros en el suelo; ya que, entre mayor sea el contenido de MO habrá menor número de microporos en estos, y mayor será su volumen; por lo tanto menor será su Da, de ahí que todos los usos presentan una Da baja asociada a los altos contenidos de MO.^[76]

La **textura** es importante por el papel que juega en la cantidad de agua que puede almacenar el suelo, por su movimiento a través del perfil y por el abastecimiento de nutrientes para la planta; así pues, la textura ideal es la Franca que garantiza las condiciones anteriormente mencionadas. De esta manera, todos los suelos estudiados presentan una textura Franco Arenosa, revelando el predominio de arenas sobre las demás partículas con valores superiores a los ideales (50–65 %), con valores bajos de arcillas (< 10–25 %) y bajos de limos (< 28–50 %) ^[74] (Figura 10 y Tabla 14); por lo cual los resultados indican un alto proceso de erosión con pérdida de partículas reactivas e importantes para el suministro de nutrientes y retención de agua útil, redundando en deficiencia severa de nutrientes que se mostrarán más adelante. Por otro lado, el suelo de cultivo presenta un contenido de arcillas significativamente superior al de los demás usos, posiblemente el efecto protector contra la erosión en este suelo se asocia a los abonos orgánicos suministrados, que mejoran la calidad de la MOH capaz de unirse a las arcillas impidiendo su pérdida. Mientras que los suelos de bosques presentan los valores más bajos de arcillas (6,27–7,00 %) y los suelos de pastura los valores más altos de arenas (77,25–77,54 %), revelando nuevamente procesos de erosión en ambos tipos de suelos, que en consecuencia la altura y pendiente influirían en estos, lo que fue observado durante el muestreo. Se deduce que el cambio de uso de suelo de bosque a pastura y cultivo influye positivamente incrementando el nivel de

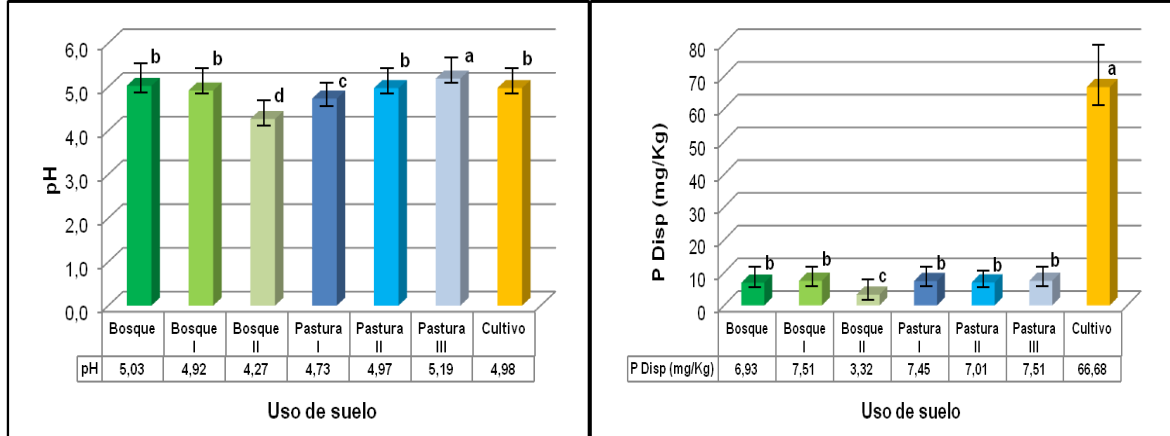
arcillas como se demuestra por la correlación positiva y significativa (0,541*), afectando la composición mineral del suelo.^[77]

Figura 10. Promedios del % de partículas presentes en las muestras



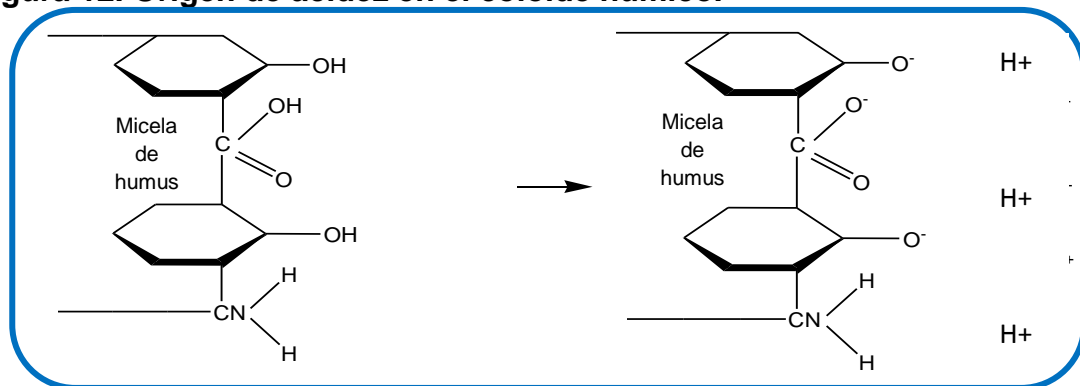
El **pH** es una propiedad importante que actúa como un indicador en las condiciones del suelo (las propiedades químicas, mineralógicas y biológicas), influyendo en disponibilidad de nutrientes para la planta, proliferación de microorganismos que favorecen los procesos de mineralización y humificación.^[78] Mientras que la fuente de acidez en los suelos se determina por la composición del mismo, las acciones de intercambio de iones y de hidrólisis que presentan los componentes inorgánicos (minerales de arcilla cristalinos, óxidos e hidróxidos, ácidos solubles, alófan, compuestos amorfos) y orgánicos existentes^[22]; al mismo tiempo el Al intercambiable (Al^{+3} y $Al(OH)^{+2}$) genera una acidez fuerte ocasionando un alto nivel de toxicidad para el desarrollo de las plantas. Por lo tanto, el pH óptimo para el suelo se encuentra entre 5,5–6,7 pero en este tipo de suelos se encontró un pH que va de extremadamente ácido (4,0–4,5) a fuertemente ácido (5,0–5,5), afectando tanto la mineralización y humificación de la materia orgánica como la disponibilidad de los nutrientes.

Figura 11. Promedios de pH y P disponible en las muestras



La acidez más fuerte se encontró en los suelos de bosque II con un promedio de 4,27 (extremadamente ácido) y el valor más alto lo presentó el suelo de pastura III (5,19 fuertemente ácido) sitio en el cual se encontró mineral de calcita (CaCO_3) (Figura 11 y Tabla 14). El suelo de cultivo a pesar de haber sufrido procesos de encalamamiento (según información verbal del agricultor de la zona aproximadamente hace un año), no logra incrementar suficientemente su valor de pH y sigue presentando una acidez muy fuerte, manifestando la alta capacidad tampón, proveniente del alto contenido de MO y una alta superficie reactiva que presentan sus coloides (alófan). Además, se confirma el efecto de cambio de uso de suelo sobre el pH y el P Disp por la baja correlación de Spearman significativa (0,167*) y altamente significativa (0,446**) respectivamente.

Figura 12. Origen de acidez en el coloide húmico.

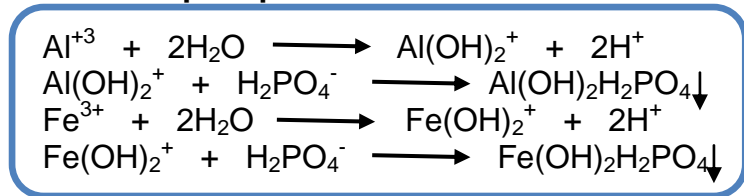


Los altos niveles de MO en estos suelos producen acidez debido a la liberación de H^+ (Figura12) como se infiere del coeficiente de correlación bajo pero altamente significativo y negativo (correlación de Spearman: -0,253**) entre el pH y MO, la

fuerte acidez imposibilita una adecuada actividad microbiana que impide procesos de mineralización y humificación, por consiguiente una acumulación de la MO.

La acidez tan fuerte en estos suelos genera una serie de inconvenientes químicos y produce severa deficiencia de nutrientes como el fósforo a causa de una alta fijación de este en forma de compuestos completamente insolubles, como los fosfatos de Fe y Al. Algunas reacciones de insolubilización del fosfato con cationes de hierro y aluminio se presentan en la Figura 13. [79]

Figura 13. Reacciones de precipitación de fosfatos



Fuente: Bravo I.

En la mayoría de los suelos existe una fuerte deficiencia de P < 8 mg/Kg (Anexo A Tabla 2) y se evidencia por la correlación de Spearman positiva altamente significativa (0,247**) entre el pH y el P Disp, su valor es bajo debido a que existen otros factores que influyen sobre su disponibilidad como la presencia de alófanos y el contenido de aluminio. En el suelo de cultivo la aplicación de fertilizantes fosfatados logran suplir la fuerte deficiencia de P quedando con altos niveles (66,68 mg/Kg) de este nutriente (Figura 11).

En condiciones de acumulación de MO (baja temperatura, alta precipitación y escasa actividad biológica) predominan los fosfatos orgánicos (principalmente fitinas (Figura 14)) no disponibles para la nutrición de las plantas; [22] por tanto, las plantas absorben el fósforo de la solución del suelo en forma de iones ortofosfato: H_2PO_4^- y HPO_4^{2-} , que se ve afectado por el pH como se observa en la Figura 15.

Figura 14. Estructura del hexafosfato de inositol

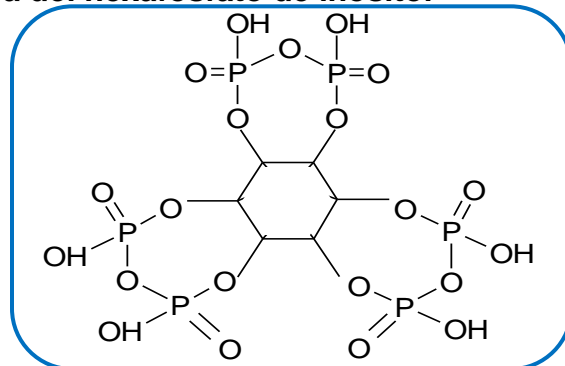
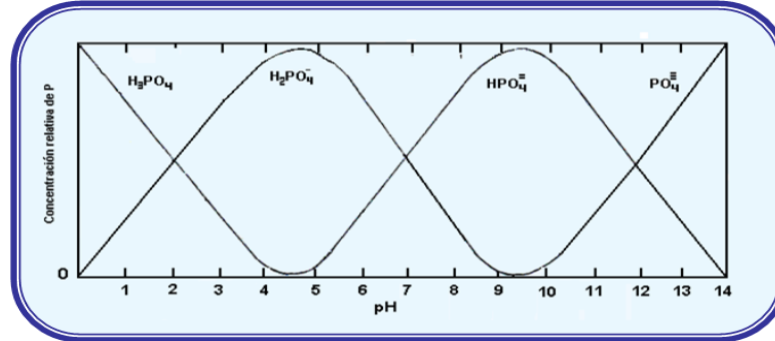


Figura 15. Relación entre la concentración relativa de iones fosfato y el pH

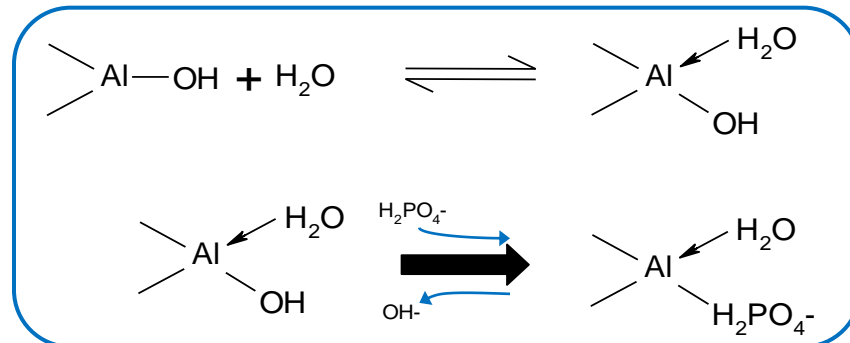


Fuente: Tsai S.M.; Rossetto R., 1992

La fracción de arcilla en estos andisoles está constituida principalmente por alófano, el material alófano es prácticamente una transición antes de cristalizarse en arcillas definidas tales como: caolinita (1:1) y montmorillonita (2:1). Los minerales arcillosos que entran en la composición de los suelos, adsorben el anión fosfato con mayor fuerza a un pH ácido que manifiestan una correlación baja pero significativa entre la disponibilidad de fósforo y el contenido de arcilla del suelo (correlación de Spearman: 0,378**), pero los distintos tipos de arcilla varían en la capacidad de adsorción de fosfatos.^[79]

Entre las arcillas con mayor capacidad de adsorción está la caolinita (1:1) probablemente por su mayor contenido de grupos Al-OH expuestos en la superficie, por la capa de alúmina que está cubierta de tetraedros sólo por un lado y por los valores bajos de pH que pueden crearse en una capa superficial positiva al formarse grupos $\text{Al}(\text{OH})^{2+}$. Luego las reacciones que se dan probablemente en una arcilla tipo caolinita, comprende la interacción de dos regiones OH del borde de la arista y a una tercera en la oclusión superficial del fosfato como una zona amorfa de la superficie de la arcilla; la fase inicial en la fijación se cree que es la hidratación seguida de una sustitución de grupos Al-OH por fosfato como se muestra en la Figura 16.^[80]

Figura 16. Adsorción de fósforo en minerales de arcilla 1:1

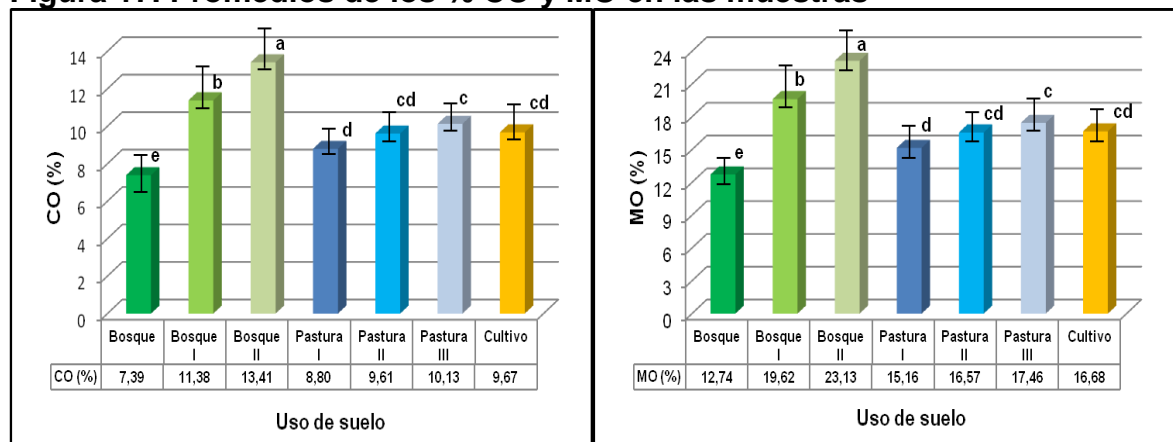


Fuente: Stevenson F., 1986

El contenido de carbono orgánico del suelo influye en la mayoría de propiedades físicas, químicas y biológicas vinculadas con su calidad, sustentabilidad y capacidad productiva; por lo que, en un manejo sostenible el COS debe mantenerse o aumentarse. En condiciones naturales, el CO del suelo resulta del balance entre la incorporación del material orgánico fresco y la salida de carbono del suelo, por procesos de erosión, lixiviación y CO₂ a la atmósfera.^[81]

Los contenidos de carbono orgánico y materia orgánica que presentan estos suelos son superiores a 5,8 % y 10 % respectivamente considerados niveles altos (Anexo A Tabla 3), producto de la fuerte acidez que impide una mineralización adecuada de la MO, esto se demuestra con la baja correlación negativa y altamente significativa de la MOS, CO con el pH (-0.253**).

Figura 17. Promedios de los % CO y MO en las muestras

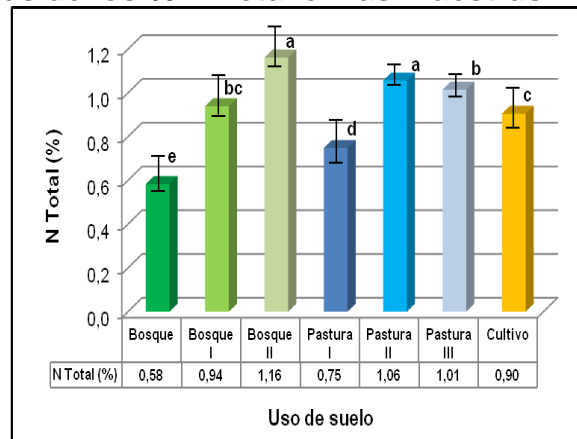


El bosque presenta los niveles más bajos de CO (Figura 17), probablemente se debe a que en este suelo el CO de la hojarasca es significativamente superior y su relación C/N es muy alta (> 18), manifestándose su poca mineralización y permaneciendo acumulada en la superficie e impidiendo su paso a la fase coloidal del suelo; esto sucede porque los microorganismos no tienen suficiente N, nutriente necesario para empezar con la descomposición bioquímica de la hojarasca, mientras que en los suelo de bosque I y bosque II la relación C/N de la hojarasca está en un rango normal (12–18) mostrando mayor transformación de ella y por lo tanto mayor aporte de MO al suelo. Estudios han demostrado que los ecosistemas forestales contienen más carbono por unidad de superficie que cualquier otro tipo de uso de la tierra y suelos que contienen cerca del 40 % del carbono total son de importancia primaria cuando se considera el manejo de los bosques. Por lo general, en los bosques naturales el carbono del suelo está en equilibrio, pero tan pronto como ocurre la deforestación o la reforestación, ese equilibrio es afectado.^[24]

Se aprecia gran pérdida de CO en el suelo de las pasturas con respecto al bosque I y II (Figura 17), efecto negativo producido por el cambio de uso del suelo con pérdida del espesor del horizonte A (10 cm) respecto a los otros usos, probablemente el pisoteo del ganado disminuye la cubierta vegetal del suelo y favorece su remoción, porque se afecta la bioestructura de suelo evitando el proceso de cementación generando procesos de erosión con pérdida de arcillas y MO.^[82] El suelo de cultivo presenta contenidos de CO inferiores a los de bosque I y bosque II, siendo igual a los de pastura; sin embargo, en este suelo hay una amplia variabilidad en los contenidos de C de las muestras individuales (Tabla 6) con rangos entre: 7,12–12,36 %; comprendidos en valores superiores al 9 % de C presentes en un 56 % de las muestras y valores entre 7 y 8 % de C presentes en un 20 % de las muestras, por ello el promedio es inferior. Lo anterior indica que la distribución del abono orgánico aplicado en dicha parcela no fue homogénea y que los altos valores en el 56 % de las parcelas se deben a una fuente exógena de CO. Por lo tanto se deduce que el cambio de uso de suelo a cultivo y pastura produce efecto negativo con pérdida de MO.

El bosque II tiene el valor más alto de CO y se puede atribuir en primer lugar a su ubicación territorial, en la parte más alta de toda la zona de muestreo, temperatura más baja y por lo tanto una menor tasa de mineralización, ante lo cual, nuevamente se ve la influencia de la extrema acidez en estos suelos que impiden una mineralización rápida de su MO por la escasa actividad microbiológica.

Figura 18. Promedios de los % N Total en las muestras



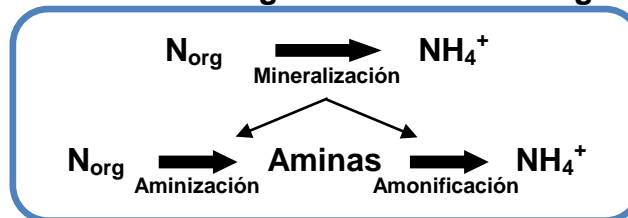
El ciclo del N en el suelo, representa solamente una parte del ciclo total del N en la naturaleza, la disponibilidad de este elemento es de gran importancia para las plantas ya que favorece el crecimiento vegetativo, le da el color verde a las hojas, produce succulencia y gobierna en las plantas el uso de potasio, fósforo y otros elementos; sin embargo hay que considerar que un exceso de este elemento

retarda la maduración de la planta, puede bajar la calidad del cultivo, debilitar la planta y provocar menos resistencia a enfermedades.^[47]

A través de los procesos microbianos de fijación de N, se produce un enriquecimiento en el suelo que conllevan a una serie de transformaciones de los compuestos nitrogenados, de manera que el contenido y las formas de nitrógeno en el suelo no presentan una naturaleza estática sino mas bien dinámica.^[22]

El nitrógeno presente en el suelo bajo formas orgánicas tampoco es disponible para las plantas, para ser absorbido tiene que pasar a formas inorgánicas: NO_3^- y NH_4^+ (Figura 19), así pues la MOS es una reserva importante de N total que hay en el suelo, aproximadamente el 98 % se encuentra formando compuestos orgánicos.

Figura 19. Transformación de N orgánico a formas inorgánicas



Fuente: Araujo C., 2006

Existen diferentes factores que afectan el contenido de N, entre ellos el clima, ya que por las temperaturas bajas la actividad de los microorganismos es baja, y por lo tanto, la velocidad de descomposición de los restos y de la materia orgánica también se ralentiza;^[47] en la Tabla 14 y Figura 18 se presentan los contenidos de N Total que para estos suelos son superiores al 0,5 % (Anexo A Tabla 4), debido a las bajas temperaturas de la zona y a la acumulación de la MO, por las condiciones químicas no adecuadas para su debida mineralización es probable que la mayoría de este N se encuentre en forma orgánica no disponible para las plantas. En el caso de las pasturas debemos considerar el aporte de este elemento realizado por las deyecciones y la orina del ganado que aun cuando no se realiza homogéneamente, incrementa el nitrógeno de estos suelos; además como se menciona anteriormente el aporte de la hojarasca a los suelos de bosque genera un incremento en los nutrientes de este. Se resalta que el uso de suelo influye significativamente en el contenido de N, pero dentro de un mismo uso igualmente hay variabilidad en este nutriente (correlación de Spearman: 0,329**)

También cabe resaltar de la prueba estadística de Rho Spearman, la correlación positiva y altamente significativa (0,473**) entre el contenido de HH y el %N Total, ya que al incrementar la humedad del suelo aumenta el crecimiento vegetal y la cantidad de materia seca que aporta nutrientes tales como el N al suelo, el

incremento en el contenido del N se explicaría en un 40 % por el incremento en la humedad, existiendo otras variables que pueden influenciar el incremento en el contenido de este nutriente, como por ejemplo el aporte de MO.

Se deduce que las muestras analizadas son representativas de las unidades de muestreo bajo un diseño estadístico que permitió obtener resultados confiables con bajas desviaciones estándar y bajos coeficientes de variación en la mayoría de las propiedades analizadas. Suelos altoandinos de esta microcuenca no habían sido analizados o al menos no se encuentran reportes en la literatura de análisis de este tipo de suelos, el último estudio realizado por el Agustín Codazzi, no indica que se hayan hecho estudio específicos en el sitio de este estudio. ^[11] Se resalta que si el cambio de uso de suelo de bosque a cultivo se hace con condiciones controladas y adecuadas de corrección de acidez, de suplemento de nutrientes deficientes y uso controlado de abonos orgánicos el cambio es positivo, con mejoramiento de las condiciones principalmente químicas del suelo que repercutirá en un aprovechamiento sostenible de estos suelos y en la obtención de una producción de cultivos no a escala industrial sino para seguridad alimentaria. El cambio a pastura si produce efectos negativos con pérdida de horizonte A y de CO que puede repercutir en una disminución de la fijación de C y por lo tanto mayor contribución a la emisión de gases efecto invernadero.

Tabla 15. Correlaciones de Rho Spearman para las propiedades físicas y químicas de las muestras de suelo

		Uso de Suelo	HH (%)	Da (g/cm ³)	Arenas (%)	Arcillas (%)	Limos (%)	pH	P Disp (mg/Kg)	CO (%)	MO (%)	N Total (%)
Uso de Suelo	Spearman	1,000	,044	-,011	-,084	,541(**)	-,309(**)	,167(*)	,446(**)	,088	,089	,329(**)
	Sig. (bilateral)	.	,572	,157	,282	,000	,000	,032	,000	,259	,256	,000
HH (%)	Spearman	,044	1,000	-,316(**)	,208(**)	-,023	-,213(**)	,068	-,316(**)	,321(**)	,321(**)	,473(**)
	Sig. (bilateral)	,572	.	,000	,007	,770	,006	,387	,000	,000	,000	,000
Da (g/cm ³)	Spearman	-,011	-,316(**)	1,000	-,061	,162(*)	-,019	,177(*)	,206(**)	-,612(**)	-,612(**)	-,539(**)
	Sig. (bilateral)	,157	,000	.	,433	,038	,812	,023	,008	,000	,000	,000
Arenas (%)	Spearman	-,084	,208(**)	-,061	1,000	-,337(**)	-,795(**)	,119	-,141	,112	,111	,175(*)
	Sig. (bilateral)	,282	,007	,433	.	,000	,000	,127	,071	,154	,154	,025
Arcillas (%)	Spearman	,541(**)	-,023	,162(*)	-,337(**)	1,000	-,235(**)	,142	,378(**)	-,180(*)	-,180(*)	-,003
	Sig. (bilateral)	,000	,770	,038	,000	.	,002	,068	,000	,021	,021	,972
Limos (%)	Spearman	-,309(**)	-,213(**)	-,019	-,795(**)	-,235(**)	1,000	-,212(**)	-,059	-,018	-,018	-,218(**)
	Sig. (bilateral)	,000	,006	,812	,000	,002	.	,006	,449	,818	,817	,005
pH	Spearman	,167(*)	,068	,177(*)	,119	,142	-,212(**)	1,000	,247(**)	-,253(**)	-,253(**)	-,135
	Sig. (bilateral)	,032	,387	,023	,127	,068	,006	.	,001	,001	,001	,085
P Disp (mg/Kg)	Spearman	446(**)	-,316(**)	,206(**)	-,141	,378(**)	-,059	,247(**)	1,000	-,120	-,119	-,075
	Sig. (bilateral)	,000	,000	,008	,071	,000	,449	,001	.	,126	,127	,341
CO (%)	Spearman	,088	,321(**)	-,612(**)	,112	-,180(*)	-,018	-,253(**)	-,120	1,000	1,000(**)	,707(**)
	Sig. (bilateral)	,259	,000	,000	,154	,021	,818	,001	,126	.	,000	,000
MO (%)	Spearman	,089	,321(**)	-,612(**)	,111	-,180(*)	-,018	-,253(**)	-,119	1,000(**)	1,000	,707(**)
	Sig. (bilateral)	,256	,000	,000	,154	,021	,817	,001	,127	,000	.	,000
N Total (%)	Spearman	,329(**)	,473(**)	-,539(**)	,175(*)	-,003	-,218(**)	-,135	-,075	,707(**)	,707(**)	1,000
	Sig. (bilateral)	,000	,000	,000	,025	,972	,005	,085	,341	,000	,000	.
	N	165	165	165	165	165	165	165	165	165	165	165

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

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

5.2 CARACTERIZACIÓN FÍSICA Y QUÍMICA DE MUESTRAS COMPUESTAS

Las muestras compuestas se analizaron porque es importante obtener la relación de humificación en estos suelos y porque en el grupo de Agroquímica otros estudiantes las utilizaron para estudios detallados relacionados con procesos de humificación y caracterización de ácidos húmicos que no era posible hacerlos con las 165 muestras por el volumen de ellas. En la Tabla 16 se muestran los resultados de las propiedades físicas y químicas de las siete unidades de muestreo para las muestras compuestas correspondientes a: bosque, bosque I, bosque II, pastura I, pastura II y pastura III, cultivo; con determinaciones de: %HH, Textura (%Arenas, %Limos, %Arcillas), pH, %CO, %MO, %N total, C/N, Ac Int (meq/100 g), Al Int (meq/100 g), CIC (meq/100 g), P Disp (mg/Kg) y sus respectivas bases de cambio con saturación y saturación efectiva.

Con el objeto de estudiar el efecto del uso de suelo sobre las propiedades físicas y químicas de las siete muestras compuestas, se aplica un análisis estadístico sometiendo inicialmente los resultados a una prueba de normalidad de **Shapiro-Will**, demostrándose que se ajustan a la normalidad ($p > 0,05$) (Anexo C Tabla 1). Por lo tanto se aplican pruebas paramétricas (**ANOVA** y **Tukey**) considerando como factor o variable independiente el uso de suelo, encontrándose diferencias significativas inferiores a 0,05 ($p=0,00$) entre todas las variables analizadas para la prueba de **ANOVA** (Anexo C Tabla 3); para saber entre cuáles usos y propiedades se encuentra la diferencia, se aplicó la prueba de **Tukey** (Anexo C Tabla 4). En la Tabla 17 se resumen los resultados de las comparaciones de las propiedades de los diferentes usos de todas las pruebas antes mencionadas.

Tabla 16. Resultados de la caracterización de las muestras compuestas

	Bosque			Bosque I			Bosque II			Pastura I			Pastura II			Pastura III			Cultivo		
%HH	13,80	13,77	13,78	19,63	19,80	19,72	18,95	18,66	18,80	14,91	14,78	14,85	19,84	19,86	19,85	18,53	18,37	18,45	14,35	14,33	14,34
	X	S (±)	%CV	X	S (±)	%CV	X	S (±)	%CV	X	S (±)	%CV	X	S (±)	%CV	X	S (±)	%CV	X	S (±)	%CV
	13,78	0,02	0,11	19,72	0,09	0,43	18,80	0,15	0,77	14,85	0,07	0,44	19,85	0,01	0,05	18,45	0,08	0,43	14,34	0,01	0,07
%Arenas	72,61	71,97	72,29	70,74	70,78	70,76	78,73	78,75	78,74	74,46	74,49	74,47	77,65	77,63	77,64	76,15	76,18	76,17	68,26	68,28	68,27
	X	S (±)	%CV	X	S (±)	%CV	X	S (±)	%CV	X	S (±)	%CV	X	S (±)	%CV	X	S (±)	%CV	X	S (±)	%CV
	72,29	0,32	0,44	70,76	0,02	0,03	78,74	0,01	0,01	74,47	0,02	0,02	77,64	0,01	0,01	76,17	0,02	0,02	68,27	0,01	0,01
%Arcillas	7,89	7,87	7,88	6,77	6,75	6,76	6,86	6,84	6,85	9,69	9,67	9,68	7,56	7,58	7,57	8,82	8,80	8,81	8,73	8,71	8,72
	X	S (±)	%CV	X	S (±)	%CV	X	S (±)	%CV	X	S (±)	%CV	X	S (±)	%CV	X	S (±)	%CV	X	S (±)	%CV
	7,88	0,01	0,13	6,76	0,01	0,15	6,85	0,01	0,15	9,68	0,01	0,10	7,57	0,01	0,13	8,81	0,01	0,11	8,72	0,01	0,11
%Limos	19,51	20,16	19,83	22,50	22,46	22,48	14,42	14,40	14,41	15,86	15,84	15,85	14,78	14,80	14,79	15,04	15,02	15,03	23,02	23,00	23,01
	X	S (±)	%CV	X	S (±)	%CV	X	S (±)	%CV	X	S (±)	%CV	X	S (±)	%CV	X	S (±)	%CV	X	S (±)	%CV
	19,83	0,33	1,64	22,48	0,02	0,09	14,41	0,01	0,07	15,85	0,01	0,06	14,79	0,01	0,07	15,03	0,01	0,07	23,01	0,01	0,04
Textura	Fr-Ar	Fr-Ar	Fr-Ar	Fr-Ar	Fr-Ar	Fr-Ar	Fr-Ar	Fr-Ar	Fr-Ar	Fr-Ar	Fr-Ar	Fr-Ar	Fr-Ar	Fr-Ar	Fr-Ar	Fr-Ar	Fr-Ar	Fr-Ar	Fr-Ar	Fr-Ar	Fr-Ar
	X	S (±)	%CV	X	S (±)	%CV	X	S (±)	%CV	X	S (±)	%CV	X	S (±)	%CV	X	S (±)	%CV	X	S (±)	%CV
	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----
pH	5,15	5,13	5,14	4,95	4,97	4,96	4,32	4,34	4,33	5,01	5,03	5,02	5,15	5,17	5,16	5,25	5,23	5,24	5,04	5,06	5,05
	X	S (±)	%CV	X	S (±)	%CV	X	S (±)	%CV	X	S (±)	%CV	X	S (±)	%CV	X	S (±)	%CV	X	S (±)	%CV
	5,14	0,01	0,19	4,96	0,01	0,20	4,33	0,01	0,23	5,02	0,01	0,20	5,16	0,01	0,19	5,24	0,01	0,19	5,05	0,01	0,20
%CO	7,49	7,46	7,48	11,81	11,79	11,80	11,89	11,94	11,91	8,53	8,50	8,52	10,57	10,49	10,53	10,60	10,56	10,58	12,55	12,45	12,50
	X	S (±)	%CV	X	S (±)	%CV	X	S (±)	%CV	X	S (±)	%CV	X	S (±)	%CV	X	S (±)	%CV	X	S (±)	%CV
	7,48	0,02	0,20	11,80	0,01	0,08	11,91	0,03	0,21	8,52	0,02	0,18	10,53	0,04	0,38	10,58	0,02	0,19	12,50	0,05	0,40
%MO	12,92	12,86	12,89	20,36	20,32	20,34	20,50	20,58	20,54	14,70	14,66	14,68	18,22	18,08	18,15	18,28	18,20	18,24	21,63	21,46	21,55
	X	S (±)	%CV	X	S (±)	%CV	X	S (±)	%CV	X	S (±)	%CV	X	S (±)	%CV	X	S (±)	%CV	X	S (±)	%CV
	12,89	0,03	0,23	20,34	0,02	0,10	20,54	0,04	0,19	14,68	0,02	0,14	18,15	0,07	0,39	18,24	0,04	0,22	21,55	0,09	0,39
%N	0,57	0,55	0,56	0,93	0,91	0,92	1,11	1,08	1,10	0,70	0,72	0,71	1,07	1,05	1,06	1,04	1,02	1,03	0,92	0,90	0,91
	X	S (±)	%CV	X	S (±)	%CV	X	S (±)	%CV	X	S (±)	%CV	X	S (±)	%CV	X	S (±)	%CV	X	S (±)	%CV
	0,56	0,01	1,79	0,92	0,01	1,09	1,10	0,02	1,39	0,71	0,01	1,41	1,06	0,01	0,94	1,03	0,01	0,97	0,91	0,01	1,10
C/N	13,22	13,50	13,24	12,76	12,92	12,84	10,68	11,02	10,86	12,13	11,88	11,92	9,92	9,94	9,98	10,21	10,30	10,26	13,68	13,84	13,78
	X	S (±)	%CV	X	S (±)	%CV	X	S (±)	%CV	X	S (±)	%CV	X	S (±)	%CV	X	S (±)	%CV	X	S (±)	%CV
	13,32	0,16	1,17	12,84	0,08	0,62	10,85	0,17	1,57	11,98	0,13	1,12	9,95	0,03	0,31	10,26	0,05	0,44	13,77	0,08	0,59
Ac int (meq/100 g)	1,16	1,18	1,17	2,31	2,33	2,32	2,53	2,51	2,52	1,13	1,15	1,14	0,94	0,96	0,95	0,82	0,84	0,83	1,27	1,25	1,26
	X	S (±)	%CV	X	S (±)	%CV	X	S (±)	%CV	X	S (±)	%CV	X	S (±)	%CV	X	S (±)	%CV	X	S (±)	%CV
	1,17	0,01	0,85	2,32	0,01	0,43	2,52	0,01	0,40	1,14	0,01	0,88	0,95	0,01	1,05	0,83	0,01	1,20	1,26	0,01	0,79
Al int (meq/100 g)	0,97	0,95	0,96	2,01	2,03	2,02	2,16	2,13	2,15	0,93	0,95	0,94	0,62	0,64	0,63	0,64	0,66	0,65	0,98	1,00	0,99
	X	S (±)	%CV	X	S (±)	%CV	X	S (±)	%CV	X	S (±)	%CV	X	S (±)	%CV	X	S (±)	%CV	X	S (±)	%CV
	0,96	0,01	1,04	2,02	0,01	0,50	2,15	0,02	0,71	0,94	0,01	1,06	0,63	0,01	1,59	0,65	0,01	1,54	0,99	0,01	1,01

Continuación (Tabla 16)

CIC (meq/100 g)	39,53	39,57	39,55	45,73	45,63	45,68	46,62	46,60	46,61	40,08	40,03	40,06	43,57	43,59	43,58	44,52	44,61	44,56	47,21	47,23	47,22
	X	S (±)	%CV	X	S (±)	%CV	X	S (±)	%CV	X	S (±)	%CV	X	S (±)	%CV	X	S (±)	%CV	X	S (±)	%CV
	39,55	0,02	0,05	45,68	0,05	0,11	46,61	0,01	0,02	40,06	0,03	0,06	43,58	0,01	0,02	44,56	0,05	0,10	47,22	0,01	0,02
P Disp (mg/Kg)	6,31	6,46	6,38	9,42	9,58	9,50	5,72	5,56	5,64	5,77	5,61	5,69	6,62	6,79	6,71	6,99	7,15	7,07	68,79	68,64	68,71
	X	S (±)	%CV	X	S (±)	%CV	X	S (±)	%CV	X	S (±)	%CV	X	S (±)	%CV	X	S (±)	%CV	X	S (±)	%CV
	6,38	0,08	1,18	9,50	0,08	0,84	5,64	0,08	1,42	5,69	0,08	1,41	6,71	0,09	1,27	7,07	0,08	1,13	68,71	0,08	0,11
Ca (meq/100 g)	0,64	0,66	0,65	0,26	0,28	0,27	0,37	0,40	0,39	1,06	1,00	1,03	2,75	2,73	2,74	3,08	3,05	3,06	3,12	3,06	3,09
	X	S (±)	%CV	X	S (±)	%CV	X	S (±)	%CV	X	S (±)	%CV	X	S (±)	%CV	X	S (±)	%CV	X	S (±)	%CV
	0,65	0,01	1,54	0,27	0,01	3,70	0,39	0,02	3,95	1,03	0,03	2,91	2,74	0,01	0,36	3,06	0,02	0,50	3,09	0,03	0,97
Mg (meq/100 g)	0,27	0,29	0,28	0,28	0,26	0,27	0,30	0,32	0,31	0,25	0,23	0,24	0,50	0,52	0,51	0,68	0,70	0,69	1,02	0,99	1,01
	X	S (±)	%CV	X	S (±)	%CV	X	S (±)	%CV	X	S (±)	%CV	X	S (±)	%CV	X	S (±)	%CV	X	S (±)	%CV
	0,28	0,01	3,57	0,27	0,01	3,70	0,31	0,01	3,23	0,24	0,01	4,17	0,51	0,01	1,96	0,69	0,01	1,45	1,01	0,02	1,52
Na (meq/100 g)	0,43	0,27	0,42	0,54	0,52	0,53	0,34	0,32	0,33	0,24	0,22	0,23	0,29	0,31	0,30	0,45	0,43	0,44	0,70	0,67	0,69
	X	S (±)	%CV	X	S (±)	%CV	X	S (±)	%CV	X	S (±)	%CV	X	S (±)	%CV	X	S (±)	%CV	X	S (±)	%CV
	0,37	0,09	24,01	0,53	0,01	1,89	0,33	0,01	3,03	0,23	0,01	4,35	0,30	0,01	3,33	0,44	0,01	2,27	0,69	0,02	2,22
K (meq/100 g)	0,41	0,30	0,31	0,39	0,36	0,38	0,36	0,38	0,37	0,23	0,21	0,22	0,38	0,40	0,39	0,42	0,40	0,41	0,71	0,73	0,72
	X	S (±)	%CV	X	S (±)	%CV	X	S (±)	%CV	X	S (±)	%CV	X	S (±)	%CV	X	S (±)	%CV	X	S (±)	%CV
	0,34	0,06	17,89	0,38	0,02	4,06	0,37	0,01	2,70	0,22	0,01	4,55	0,39	0,01	2,56	0,41	0,01	2,44	0,72	0,01	1,39
Ca/Mg (meq/100 g)	0,32	2,31	2,33	0,93	1,06	1,02	1,24	1,27	1,26	4,27	4,28	4,24	5,49	5,25	5,40	4,51	4,37	4,44	3,04	3,08	3,04
	X	S (±)	%CV	X	S (±)	%CV	X	S (±)	%CV	X	S (±)	%CV	X	S (±)	%CV	X	S (±)	%CV	X	S (±)	%CV
	1,65	1,15	69,84	1,00	0,07	6,64	1,26	0,02	1,22	4,26	0,02	0,49	5,38	0,12	2,25	4,44	0,07	1,58	3,05	0,02	0,76
(Ca+Mg)/K (meq/100 g)	2,34	3,16	3,03	1,39	1,48	1,43	1,90	1,89	1,87	5,69	5,88	5,71	8,48	8,12	8,24	8,96	9,36	9,16	5,79	5,56	5,79
	X	S (±)	%CV	X	S (±)	%CV	X	S (±)	%CV	X	S (±)	%CV	X	S (±)	%CV	X	S (±)	%CV	X	S (±)	%CV
	2,84	0,44	15,50	1,43	0,05	3,15	1,89	0,02	0,81	5,76	0,10	1,81	8,28	0,18	2,21	9,16	0,20	2,18	5,71	0,13	2,32
CICE (meq/100 g)	1,64	2,86	2,82	3,78	3,75	3,77	3,90	3,94	3,92	2,91	2,82	2,86	4,86	4,93	4,89	5,45	5,42	5,43	6,82	6,71	6,82
	X	S (±)	%CV	X	S (±)	%CV	X	S (±)	%CV	X	S (±)	%CV	X	S (±)	%CV	X	S (±)	%CV	X	S (±)	%CV
	2,44	0,69	28,41	3,77	0,02	0,41	3,92	0,02	0,51	2,86	0,05	1,57	4,89	0,04	0,72	5,43	0,02	0,28	6,78	0,06	0,94
%SB	2,80	4,25	4,18	3,22	3,12	3,17	2,94	3,05	2,99	4,43	4,17	4,31	9,00	9,09	9,03	10,41	10,26	10,33	11,76	11,55	11,76
	X	S (±)	%CV	X	S (±)	%CV	X	S (±)	%CV	X	S (±)	%CV	X	S (±)	%CV	X	S (±)	%CV	X	S (±)	%CV
	3,74	0,82	21,84	3,17	0,05	1,58	2,99	0,06	1,84	4,30	0,13	3,02	9,04	0,05	0,51	10,33	0,08	0,73	11,69	0,12	1,04

HH: Humedad Higroscópica; P Disp: Fósforo disponible; CO: Carbono Orgánico; MO: Materia Orgánica; N Total: Nitrógeno Total; Ac Int: Acidez Intercambiable; Al Int: Aluminio Intercambiable; SA: Saturación de Aluminio; SAE: Saturación de Aluminio Efectiva; CIC: Capacidad de Intercambio Catiónico; CICE: Capacidad de Intercambio Catiónico Efectiva; SB: Saturación de Bases; SBE: Saturación de Bases Efectiva; Ca: Calcio; SCa: Saturación de Calcio; SCaE: Saturación de Calcio Efectiva; Mg: Magnesio; SMg: Saturación de Magnesio; SMgE: Saturación de Magnesio Efectiva; Na: Sodio; SNa: Saturación de Sodio; SMgE: Saturación de Sodio Efectiva; K: Potasio; SK: Saturación de Potasio; SKE: Saturación de Potasio Efectiva; Ca/Mg: Calcio/Magnesio; Ca+Mg/K: Calcio+Magnesio/ Potasio.

Tabla 17. Comparación de promedios de las propiedades físicas y químicas de las muestras compuestas de suelos con diferente uso (Prueba de Tukey)

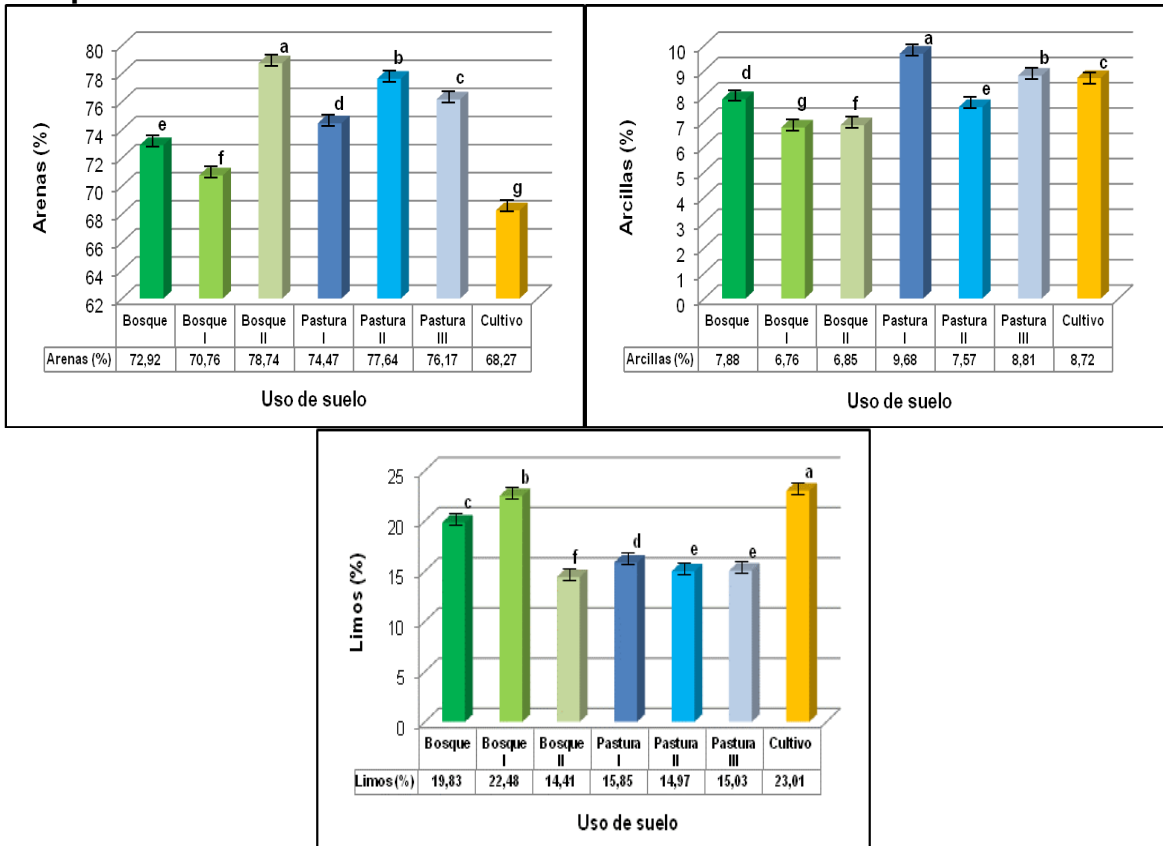
	Bosque	Bosque I	Bosque II	Pastura I	Pastura II	Pastura III	Cultivo
HH (%)	13,78 ^f	19,72 ^a	18,80 ^b	14,85 ^d	19,85 ^a	18,45 ^c	14,34 ^e
Arenas (%)	72,29 ^e	70,76 ^f	78,74 ^a	74,47 ^d	77,64 ^b	76,17 ^c	68,27 ^g
Arcillas (%)	7,88 ^d	6,76 ^g	6,85 ^f	9,68 ^a	7,57 ^e	8,81 ^b	8,72 ^c
Limos (%)	19,83 ^c	22,48 ^b	14,41 ^f	15,85 ^d	14,79 ^e	15,03 ^e	23,01 ^a
pH	5,14 ^b	4,96 ^e	4,33 ^f	5,02 ^d	5,16 ^b	5,24 ^a	5,05 ^c
P Disp (mg/Kg)	6,38 ^e	9,50 ^b	5,64 ^f	5,69 ^f	6,71 ^d	7,07 ^c	68,71 ^a
CO (%)	7,48 ^f	11,80 ^c	11,91 ^b	8,52 ^e	10,53 ^d	10,58 ^d	12,50 ^a
MO (%)	12,89 ^f	20,34 ^c	20,54 ^b	14,68 ^e	18,15 ^d	18,24 ^d	21,55 ^a
N Total (%)	0,56 ^e	0,92 ^c	1,10 ^a	0,71 ^d	1,06 ^b	1,03 ^b	0,91 ^c
Ac Int (meq/100 g)	1,17 ^d	2,32 ^b	2,52 ^a	1,14 ^e	0,95 ^f	0,83 ^g	1,26 ^c
Al Int (meq/100 g)	0,96 ^{cd}	2,02 ^b	2,15 ^a	0,94 ^d	0,63 ^e	0,65 ^e	0,99 ^c
SAI (%)	2,43 ^c	4,42 ^b	4,60 ^a	2,34 ^d	1,45 ^f	1,46 ^f	2,09 ^e
SAIE (%)	33,95 ^b	53,56 ^a	54,78 ^a	32,80 ^b	12,92 ^d	11,97 ^d	14,61 ^c
CIC (meq/100 g)	39,55 ^g	45,68 ^c	46,61 ^b	40,06 ^f	43,58 ^e	44,56 ^d	47,22 ^a
CICE (meq/100 g)	2,83 ^f	3,77 ^e	3,92 ^d	2,86 ^f	4,89 ^c	5,43 ^b	6,77 ^a
SB (%)	4,19 ^d	3,17 ^e	2,99 ^e	4,30 ^d	9,04 ^c	10,33 ^b	11,65 ^a
SBE (%)	58,67 ^d	38,44 ^e	35,65 ^f	60,17 ^c	80,55 ^b	84,71 ^a	81,34 ^b
Ca (meq/100 g)	0,65 ^d	0,27 ^f	0,39 ^e	1,03 ^c	2,74 ^b	3,06 ^a	3,09 ^a
SCa (%)	1,64 ^e	0,59 ^g	0,83 ^f	2,57 ^d	6,28 ^c	6,87 ^a	6,54 ^b
SCaE (%)	22,96 ^d	7,17 ^f	9,92 ^e	35,99 ^c	55,98 ^a	56,38 ^a	45,64 ^b
Mg (meq/100 g)	0,28 ^{de}	0,27 ^{ef}	0,31 ^d	0,24 ^f	0,51 ^c	0,69 ^b	1,01 ^a
SMg (%)	0,71 ^d	0,59 ^e	0,66 ^d	0,60 ^e	1,17 ^c	1,54 ^b	2,14 ^a
SMgE (%)	9,87 ^d	7,14 ^g	7,90 ^f	8,44 ^e	10,41 ^c	12,67 ^b	14,92 ^a
Na (meq/100 g)	0,42 ^c	0,53 ^b	0,33 ^d	0,23 ^e	0,30 ^d	0,44 ^c	0,69 ^a
SNa (%)	1,07 ^c	1,17 ^b	0,71 ^e	0,57 ^f	0,69 ^e	0,99 ^d	1,45 ^a
SNaE (%)	14,81 ^a	14,14 ^b	8,40 ^d	8,02 ^d	6,15 ^e	8,15 ^{-d}	10,13 ^c
K (meq/100 g)	0,31 ^d	0,38 ^c	0,37 ^c	0,22 ^e	0,39 ^{bc}	0,41 ^b	0,72 ^a
SK (%)	0,78 ^c	0,82 ^c	0,79 ^c	0,55 ^d	0,90 ^b	0,92 ^b	1,52 ^a
SKE (%)	10,95 ^a	10,00 ^{bc}	9,43 ^c	7,71 ^d	8,02 ^d	7,52 ^d	10,64 ^{ab}
Ca/Mg (meq/100 g)	2,33 ^e	1,00 ^g	1,26 ^f	4,26 ^c	5,38 ^a	4,45 ^b	3,06 ^d
Ca+Mg/K (meq/100 g)	3,00 ^d	1,43 ^f	1,89 ^e	5,76 ^c	8,28 ^b	9,19 ^a	5,69 ^c

HH: Humedad Higroscópica; P Disp: Fósforo disponible; CO: Carbono Orgánico; MO: Materia Orgánica; N Total: Nitrógeno Total; Ac Int: Acidez Intercambiable; Al Int: Aluminio Intercambiable; SA: Saturación de Aluminio; SAE: Saturación de Aluminio Efectiva; CIC: Capacidad de Intercambio Catiónico; CICE: Capacidad de Intercambio Catiónico Efectiva; SB: Saturación de Bases; SBE: Saturación de Bases Efectiva; Ca: Calcio; SCa: Saturación de Calcio; SCaE: Saturación de Calcio Efectiva; Mg: Magnesio; SMg: Saturación de Magnesio; SMgE: Saturación de Magnesio Efectiva; Na: Sodio; SNa: Saturación de Sodio; SMgE: Saturación de Sodio Efectiva; K: Potasio; SK: Saturación de Potasio; SKE: Saturación de Potasio Efectiva; Ca/Mg: Calcio/Magnesio; Ca+Mg/K: Calcio+Magnesio/ Potasio. Letras distintas en sentido horizontal difieren significativamente ($p < 0,05$).

En la Tabla 17, se relacionan los resultados de la caracterización completa de las siete unidades de muestreo, observando que hay diferencias significativas en la mayoría de las propiedades físicas-químicas de los suelos con diferente y dentro del mismo uso. Todas las muestras compuestas presentan una textura Franco Arenosa, con valores altos de arena (78,74 a 68,27 %), bajos valores de arcillas (9,68 a 6,76 %) y limos (23,01 a 14,41 %) (Figura 20 y Tabla 17), evidenciando

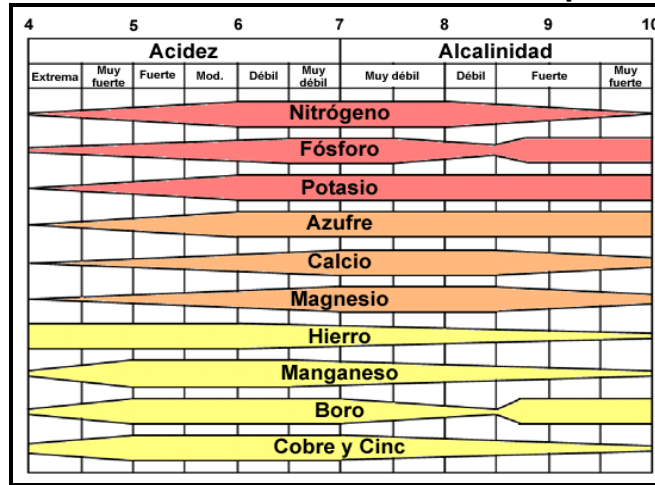
severo proceso de erosión, pérdida de partículas finas que tienen la propiedad de suministrar nutrientes para la planta, retener humedad y adsorber metales contaminantes impidiendo su paso a horizontes más profundos.^[83]

Figura 20. Promedios del % de partículas presentes en las muestras compuestas



El **pH** influye en la disponibilidad de todos los nutrientes (Figura 21), regula la actividad biológica del suelo condicionando su fertilidad o el desarrollo de la planta, de modo que estos suelos muestran valores de acidez extrema en el bosque II, muy fuerte para el bosque I y fuerte en los demás suelos; influyendo en la disponibilidad de macro y micronutrientes para la planta (Figura 22 y Tabla 17). El contenido de fósforo se afecta por la disminución del pH del suelo ya que, a pH bajos se precipita en forma de fosfatos de Al y Fe (Figura 13) o a la adsorción sobre la fase coloidal por intercambio aniónico; sin embargo, el nivel de este nutriente es alto en el suelo de cultivo y proviene de la aplicación de fertilizantes fosfatados. El encalamiento en el suelo de cultivo logró aumentar los niveles de Ca y Mg pero no fue suficiente para disminuir su fuerte acidez, porque el alto contenido de MO genera una capacidad buffer muy fuerte que impide cambios bruscos de pH.

Figura 21. Disponibilidad de nutrientes de acuerdo al pH



Fuente: Avila J.,2003

Figura 22. Promedios de pH en las muestras compuestas

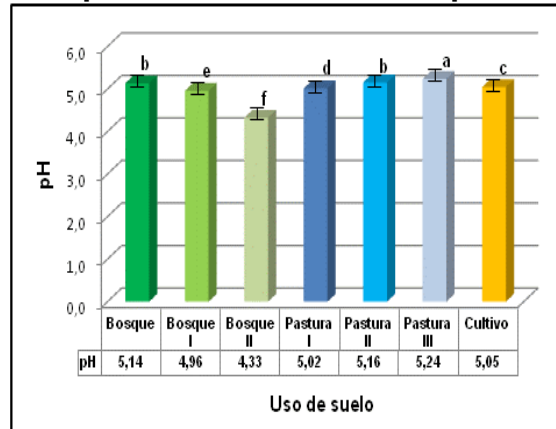
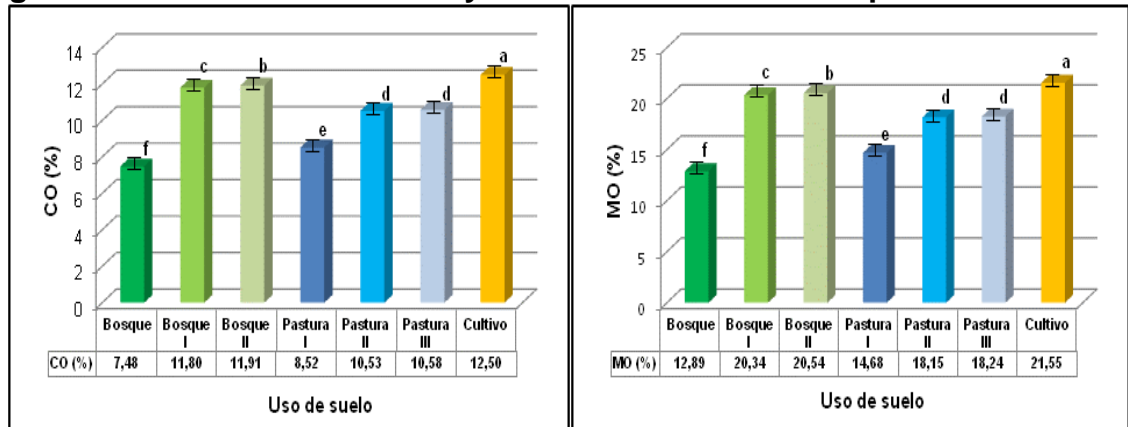


Figura 23. Promedios del % CO y MO en las muestras compuestas

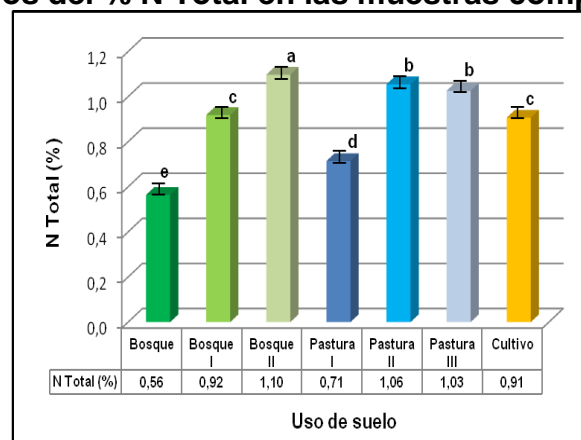


Hay un incremento en el %CO de las muestras compuestas de cultivo con respecto al de las 25 submuestras utilizadas para formar la muestra compuesta (Figura 17 y 23), esto se atribuye como se manifestó anteriormente a la amplia variabilidad en los datos de las 25 submuestras, producto de una distribución no uniforme del abono orgánico aplicado. Por esta razón, el nivel de CO en suelos de cultivo es significativamente superior al de los demás usos, lo que confirma los resultados encontrados en suelos sometidos a un tratamiento de fertilización orgánica durante largos periodos de tiempo.^[84]

En los suelos de bosque el contenido de CO del bosque es significativamente inferior (7,48 %) al de los otros dos (11,80 % y 11,91 %), porque de igual manera como se explicó anteriormente en estos suelos la hojarasca no ha sido igualmente transformada con respecto a los otros dos bosques, permaneciendo acumulada, como se deduce por la alta relación C/N en ella. En las pasturas se ha producido una disminución en el nivel de CO con respecto a los bosques I y II efecto negativo por el cambio de uso de suelo, con pérdida del espesor del Horizonte A (Figura 23 y Tabla 17).

Los altos niveles de materia orgánica en estos suelos > 12 % (Figura 23 y Tabla 17) se pueden asociar a la fuerte acidez que impiden una transformación adecuada, así como a altos contenidos de alófono (aluminosilicatos no cristalinos constituidos principalmente por $Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 \cdot 4H_2O$ originado de arcillas de suelos derivados de cenizas volcánicas) que se unen fuertemente a la MO impidiendo su mineralización. Se ha evidenciado que la materia orgánica del suelo es un indicador clave de la calidad del suelo, tanto en sus funciones agrícolas como en sus funciones ambientales, por su captura de carbono y calidad del aire.^[24]

Figura 24. Promedios del % N Total en las muestras compuestas

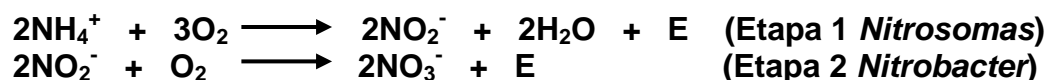


El **nitrógeno total** presente en los suelo es > 0,5 % (Figura 24 y Tabla 17) considerado como un valor alto para estos suelos (Anexo A Tabla 4) y se atribuye

al alto nivel de MO; sin embargo no se puede asegurar su alta disponibilidad para la nutrición de las plantas, debido a que ese valor incluye tanto el nitrógeno orgánico como inorgánico (asimilable).

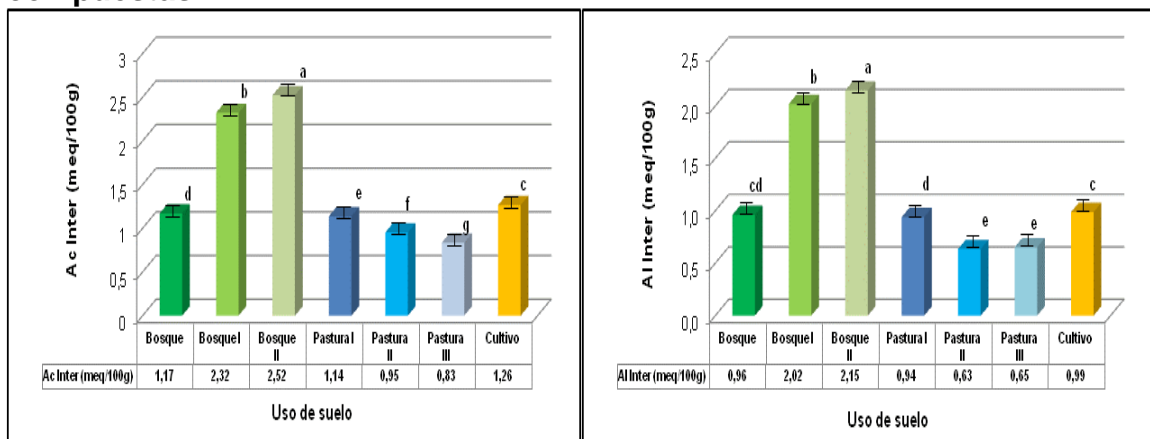
La correlación de Pearson positiva y altamente significativa (0,791**) con la MO indica que la mayoría del N proviene de la MOS y dada a su alta acidez impedirá una mineralización adecuada de los compuestos orgánicos nitrogenados limitando la actividad catalítica de las bacterias que poseen la capacidad de realizar el proceso de nitrificación (Figura 25) que tiene lugar a intervalos de pH comprendidos entre 6,5-8.^[21]

Figura 25. Reacción de etapas de nitrificación



Fuente: Araujo C., 2006

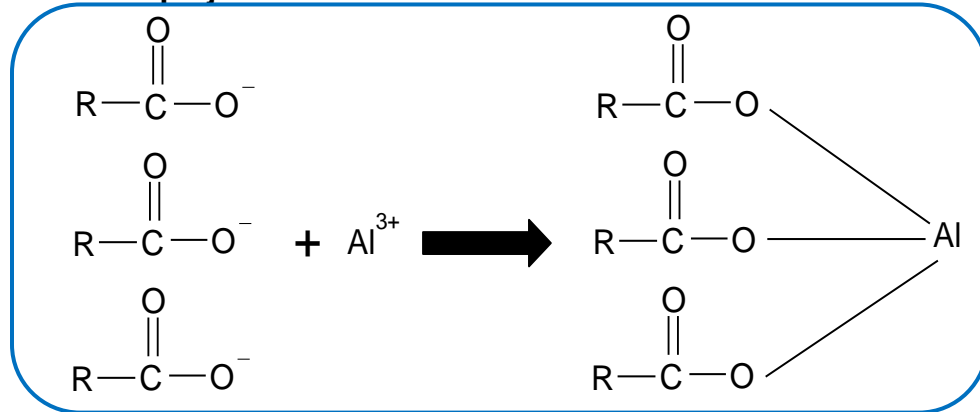
Figura 26. Promedios de la Acidez y Aluminio intercambiable en las muestras compuestas



La **acidez intercambiable** en estos suelos se atribuye principalmente al Al de cambio cuyos niveles están en rangos bajos en la mayoría de los suelos (Figura 26 y Tabla 17), con excepción de los suelos de bosque I y II en los cuales el nivel está en un rango medio (Anexo A Tabla 5). El bajo contenido de Al intercambiable se podría atribuir a su complejación con aniones orgánicos (Figura 27) presentes en el suelo en altas concentraciones debido a la acumulación de la MO que presenta la mayor capacidad de absorción y fuerza de ligando para la mayoría de los elementos metálicos, exceptuando algunos materiales inorgánicos no cristalinos;^[81] sin embargo el Al es capaz de generar fuerte acidez ya que 1 mol de

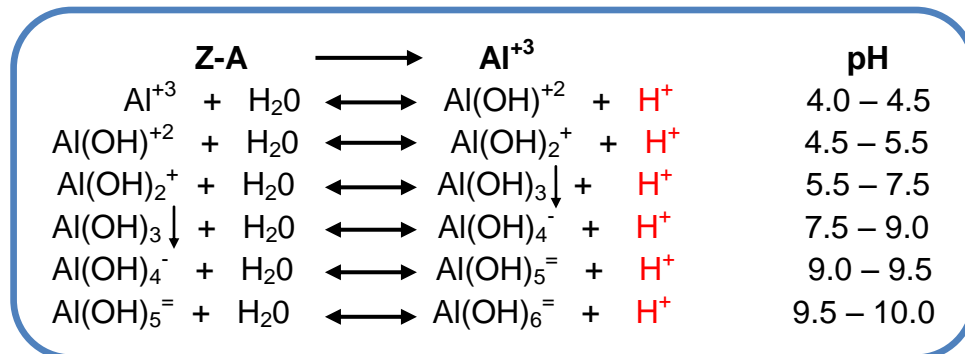
Al genera hasta 6 moles de H⁺ de acuerdo a las reacciones de intercambio e hidrólisis (Figura 28).

Figura 27. Complejación de la MO con el Al



Fuente:Silva F., 2000

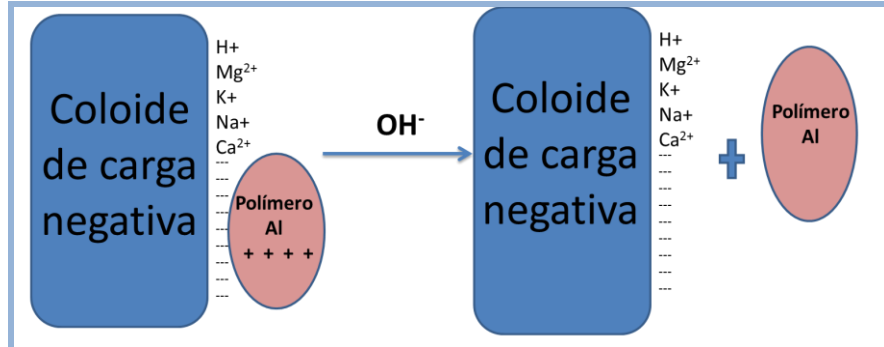
Figura 28. Reacción de intercambio e hidrólisis



Fuente:Silva F., 2000

La MO igualmente puede generar acidez intercambiable por liberación a la solución del suelo de cargas H⁺ (Figura 12), verificando esta hipótesis mediante la correlación de Pearson positiva y significativa (0,485*) entre acidez intercambiable y MO. Se ha manifestado que el contenido alto de carbono orgánico se atribuye, en parte, a la formación de complejos estables de sustancias húmicas con aluminio y otros constituyentes no cristalinos que los protegen de la degradación microbiana.^[50] El Al también puede estar precipitado en forma de fosfatos de Al como se demostró anteriormente, produciendo inmovilización de P (Figura 13)

Figura 29. Reacción de las cargas del Al con los coloides



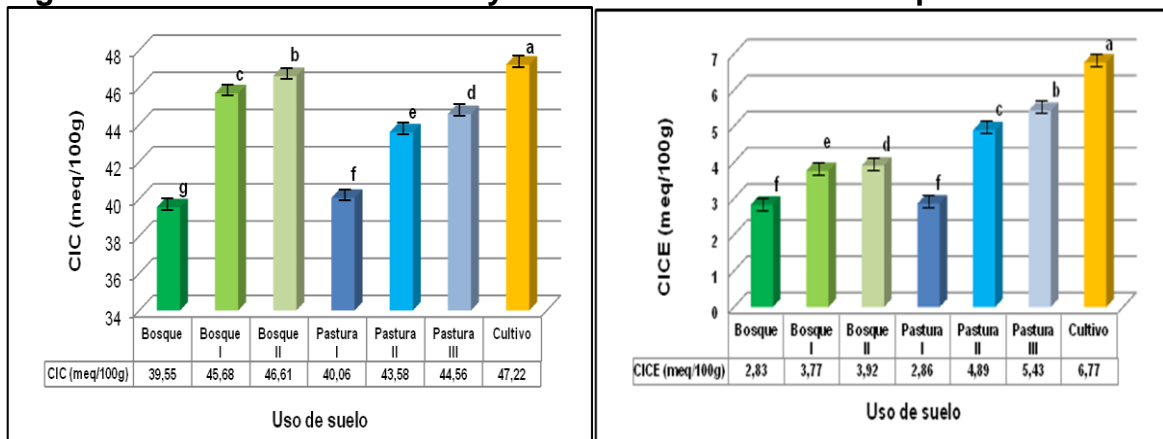
Fuente: Del Pino A., 2010

Los compuestos de Al tienen gran influencia sobre el estado buffer del suelo, ya que algunos de ellos poseen cargas positivas que bloquean las cargas negativas de los coloides (Figura 29), por lo tanto, disminuye la capacidad de retener elementos para realizar un posterior intercambio, de esta manera se puede ver disminuido el crecimiento y desarrollo de la planta así como la fertilidad de estos suelos, ^[85,86] ya que puede afectar la retención de las bases de cambio, como se observa en la Tabla 17. Existen cambios significativos en los contenidos de Al de todos los usos (Figura 26 y Tabla 17), atribuible al cambio en la reacción química de estos suelos (Figura 28), a mayor acidez mayor contenido de Al intercambiable como se demuestra por la correlación de Pearson negativa y altamente significativa (-0,821**) entre Al y pH. El bosque II presentan el valor más alto para este parámetro (2,15 meq/100 g) lo cual certifica que es el suelo más ácido de todos los usos, verificando la fuerte influencia del Al en la generación de acidez, con valores medios de saturación efectiva de Al que producen toxicidad no solamente a los cultivos sino a los microorganismos impidiendo una adecuada transformación de la MO (Anexo A Tabla 5). Estos niveles de Al en bosques se asocian con la fuerte deficiencia de bases, como se deduce de la correlación negativa y altamente significativa de Al intercambiable y saturación de Al con la saturación de bases de Ca y Mg (correlación de Pearson: -0,777**; -0,497*; -0,843**; -0,578** respectivamente). Esta pérdida de bases de cambio por continua extracción sin reposición es lo que genera la fuerte acidez y aumento del Al intercambiable.

Las pasturas presentan los valores más bajos de todos los usos de suelo, que los ubican dentro de un rango bajo para el Al intercambiable (< 0,94 meq/100 g); contenido que no presenta ninguna toxicidad para las plantas (Anexo A Tabla 5). Estos suelos presentan valores superiores de Ca con respecto a los bosques con saturaciones altas (Tabla 17) que hacen que desplace al Al de sus sitios de intercambio y éste forme quelatos y complejos con la MO en estos suelos (Figura 27). Se destaca que el suelo de cultivo igualmente presenta valores bajo de Al con baja saturación (0,99 meq/100 g y 2,09 % respectivamente), producto del

encalamiento efectuado en estos suelos que incrementa los valores de Ca y Mg desplazando del complejo de cambio al Al e igualmente siendo complejado por la MOS; como se infiere por la correlación Pearson baja pero positiva y significativa del Al con la MO (0,451*).

Figura 30. Promedios de la CIC y CICE en las muestras compuestas

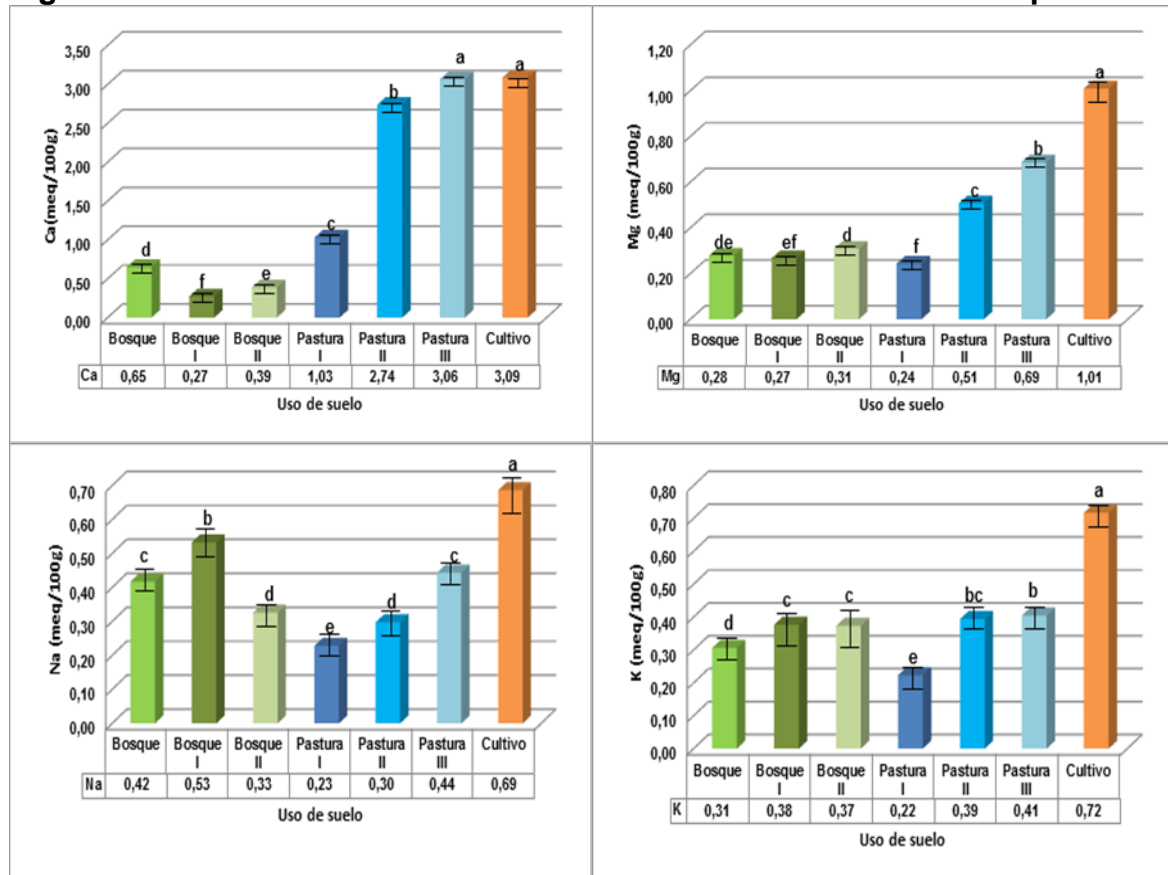


La **CIC** es muy importante en la retención de macro y micronutrientes que pueden perderse del sistema suelo-raíz por lixiviación. En suelos ácidos es mucho más importante el concepto de CIC efectiva que denota la capacidad real de un suelo para retener y suministrar nutrientes a las plantas. Todos los suelos estudiados presentan valores muy elevados > 30 meq/100 g de CIC, asociados a los altos contenido de MO, sin descartar el aporte de las arcillas, esto se confirma con la correlación positiva y altamente significativa entre CIC y MO (0,987**). La CIC efectiva en suelos de bosques y pastura I es inferior a 4 meq/100 g (Tabla 17) ocasionado pérdidas de nutrientes como el Ca, Mg o K por lixiviación. Nuevamente se manifiesta el efecto del encalamiento y aplicación de abonos en el suelo de cultivo en donde es significativamente superior tanto la CIC como la CICE (Figura 30). Los suelos de pastura II y III igualmente presentan valores de CICE superior a la de los bosques (Figura 30 Tabla 17), por el efecto de la calcita encontrada en estos suelo.

Se detecta fuerte deficiencia de Mg en los suelos de bosques y pasturas < 0,7 meq/100 g Figura 31 (Anexo A Tabla 8). El encalamiento en suelos de cultivo logró subir el nivel de Mg pero aún sigue con deficiencia (1,01 meq/100 g). Igualmente existe deficiencia de Ca en suelos de bosques y pasturas I y II Figura 31 Tabla 17 (Anexo A Tabla 8). En suelos de cultivo y pastura III no existe deficiencia de esta base por procesos de encalamiento y presencia de calcita respectivamente. No existe deficiencia de K en ningún suelo > 0,22 meq/100 g, puesto que prevalecen arcillas tipo 1:1 que no presentan fijación de este nutriente Figura 31 Tabla 17 (Anexo A Tabla 8). El Na es normal en todos ellos < 0,69 meq/100 g Figura 31

Tabla 17 (Anexo A Tabla 8). La relación Ca/Mg en los suelos de bosques I y II es baja (< 2 meq/100 g) acentuándose en estos suelos la deficiencia de Ca. En suelos de pastura II es alta (> 5 meq/100 g) predominando en este suelo la deficiencia de Mg (Anexo A Tabla 9). La relación Ca+Mg/K es deficiente < 40 , implicando que predomina la deficiencia Ca y Mg para todos los usos de suelo (Tabla 17).

Figura 31. Promedios de las Bases de cambio en las muestras compuestas



La correlación positiva del Ca con las arcillas (correlación de Pearson: 0,470*), demuestra que este catión divalente se adsorbe fácilmente sobre la superficie de las arcillas por intercambio debido a su radio iónico, mientras que el Al tiene la capacidad de formar más fácilmente complejos o quelatos con la MO. En cuanto a las otras bases (Mg, Na, K) correlacionan positivamente con la MO (0,512*; 0,537*; 0,689** respectivamente) demostrando su afinidad sobre los sitios de intercambio de este coloide. Las bases Na y K se pierden fácilmente por lavado como se demuestra por la correlación negativa y significativa con las arenas (-0,794**; -0,519*), porque son menos retenidas que las bases divalentes.

La saturación de bases en todos los suelos es inferior al 15 % (Figura 32 Tabla 17) que corresponde a un nivel muy bajo (Anexo A Tabla 8), mostrando pérdida de bases de cambio por extracción de nutrientes o por pérdida por lavado sin reposición. El suelo de cultivo presenta la mayor saturación de bases (11,65 %), por razones explicadas anteriormente, sin embargo se denota que el encalamiento no fue suficiente para el aporte de bases al suelo y al cultivo. Los suelos de bosque I y II presentan la más baja saturación de bases (3,17 y 2,99 % respectivamente). La correlación positiva y altamente significativa de saturación de bases con el pH (0,551**) muestra la fuerte influencia de la reacción química del suelo en este parámetro. $A > pH > \%SB$. Las saturaciones de cada una de las bases comprueban en general su fuerte deficiencia en estos suelos ya que son bajas Tabla 17 (Anexo A Tabla 8).

Figura 32. Promedios del % Saturación de bases en las muestras compuestas

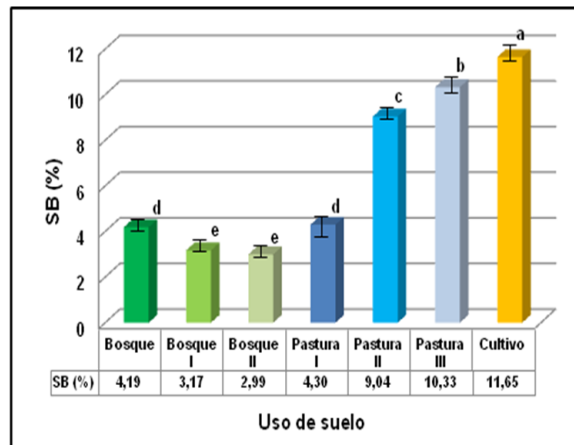


Tabla 18. Correlaciones de Pearson para las muestras compuestas

		Arcillas (%)	Limos (%)	CO (%)	MO (%)	N Total (%)	Ac Int (meq/100 g)	Al Int (meq/100 g)	CIC (meq/100 g)	Ca (meq/100 g)	Mg (meq/100 g)	Na (meq/100 g)	K (meq/100 g)	SB (%)	SCa (%)	SMg (%)	SK (%)	SNa (%)	SAI (%)	
Uso Suelo	Pearson	,515(**)	-,580(**)	,140	,140	,509(*)	-,586(**)	-,604(**)	,108	,761(**)	,441(*)	-,250	,088	,660(**)	,785(**)	,468(*)	,079	-,323	-,655(**)	
	Sig. (bilateral)	,017	,006	,545	,546	,018	,005	,004	,640	,000	,045	,274	,706	,001	,000	,033	,732	,153	,001	
HH (%)	Pearson	-,614(**)	-,369	,502(*)	,502(*)	,800(**)	,372	,339	,475(*)	-,005	-,157	-,192	-,123	-,070	-,002	-,183	-,188	-,284	,288	
	Sig. (bilateral)	,003	,100	,020	,020	,000	,097	,133	,030	,981	,496	,404	,596	,762	,993	,426	,416	,213	,206	
Arenas (%)	Pearson	-,177	-,959(**)	-,105	-,104	,481(*)	,033	,004	-,087	-,044	-,359	-,794(**)	-,519(**)	-,178	-,008	-,347	-,545(*)	-,836(**)	,000	
	Sig. (bilateral)	,443	,000	,652	,653	,027	,888	,986	,708	,849	,110	,000	,016	,441	,972	,124	,011	,000	1,000	
Arcillas (%)	Pearson	1	-,108	-,389	-,389	-,378	-,732(**)	-,701(**)	-,413	,470(*)	,330	-,092	,015	,437(*)	,490(*)	,372	,055	-,063	-,682(**)	
	Sig. (bilateral)	.	,640	,081	,081	,091	,000	,000	,063	,032	,144	,693	,949	,047	,024	,096	,814	,786	,001	
Limos (%)	Pearson	-,108	1	,217	,217	-,377	,177	,197	,206	-,090	,268	,828(**)	,520(*)	,054	-,133	,243	,535(*)	,863(**)	,196	
	Sig. (bilateral)	,640	.	,344	,345	,092	,442	,392	,369	,697	,241	,000	,016	,817	,566	,288	,012	,000	,395	
pH	Pearson	,507(*)	,211	-,395	-,395	-,352	-,838(**)	-,821(**)	-,413	,561(*)	,325	,180	,077	,551(**)	,588(**)	,380	,158	,275	-,804(**)	
	Sig. (bilateral)	,019	,358	,076	,076	,117	,000	,000	,063	,008	,151	,434	,741	,010	,005	,090	,495	,228	,000	
CO (%)	Pearson	-,389	,217	1	1,000(**)	,791(**)	,485(*)	,451(*)	,987(**)	,255	,512(*)	,537(*)	,689(**)	,310	,202	,451(*)	,608(**)	,381	,350	
	Sig. (bilateral)	,081	,344	.	,000	,000	,026	,040	,000	,265	,018	,012	,001	,171	,381	,040	,003	,088	,120	
MO (%)	Pearson	-,389	,217	1,000(**)	1	,791(**)	,485(*)	,451(*)	,987(**)	,254	,512(*)	,537(*)	,689(**)	,310	,201	,451(*)	,608(**)	,381	,350	
	Sig. (bilateral)	,081	,345	,000	.	,000	,026	,040	,000	,266	,018	,012	,001	,171	,381	,040	,003	,088	,119	
N Total (%)	Pearson	-,378	-,377	,791(**)	,791(**)	1	,274	,227	,788(**)	,360	,333	,037	,333	,321	,340	,297	,257	-,115	,131	
	Sig. (bilateral)	,091	,092	,000	,000	.	,230	,323	,000	,109	,140	,873	,141	,155	,132	,190	,260	,620	,572	
Ac Int (meq/100g)	Pearson	-,732(**)	,177	,485(*)	,485(*)	,274	1	,997(**)	,483(*)	-,715(**)	-,412	,088	-,053	-,666(**)	-,751(**)	-,477(*)	-,138	,016	,986(**)	
	Sig. (bilateral)	,000	,442	,026	,026	,230	.	,000	,027	,000	,064	,703	,818	,001	,000	,029	,550	,944	,000	
Al Int (meq/100g)	Pearson	-,701(**)	,197	,451(*)	,451(*)	,227	,997(**)	1	,452(*)	-,742(**)	-,432	,096	-,079	-,690(**)	-,777(**)	-,497(*)	-,163	,031	,994(**)	
	Sig. (bilateral)	,000	,392	,040	,040	,323	,000	.	,040	,000	,050	,680	,733	,001	,000	,022	,480	,895	,000	
CIC (meq/100g)	Pearson	-,413	,206	,987(**)	,987(**)	,788(**)	,483(*)	,452(*)	1	,262	,541(*)	,574(**)	,715(**)	,325	,206	,482(*)	,636(**)	,427	,349	
	Sig. (bilateral)	,063	,369	,000	,000	,000	,027	,040	.	,252	,011	,007	,000	,150	,369	,027	,002	,053	,121	
P Disp (mg/Kg)	Pearson	,254	,629(**)	,500(*)	,500(*)	,034	-,112	-,125	,499(*)	,499(*)	,822(**)	,792(*)	,917(**)	,612(**)	,448(*)	,799(**)	,921(**)	,736(**)	-,184	
	Sig. (bilateral)	,268	,002	,021	,021	,885	,628	,589	,021	,021	,000	,000	,000	,003	,041	,000	,000	,000	,424	
Ca (meq/100g)	Pearson	,470(*)	-,090	,255	,254	,360	-,715(**)	-,742(**)	,262	1	,868(**)	,301	,607(**)	,987(**)	,998(**)	,893(**)	,636(**)	,257	-,812(**)	
	Sig. (bilateral)	,032	,697	,265	,266	,109	,000	,000	,252	.	,000	,186	,004	,000	,000	,000	,002	,262	,000	
Mg (meq/100g)	Pearson	,330	,268	,512(*)	,512(*)	,333	-,412	-,432	,541(*)	,868(**)	1	,675(**)	,903(**)	,929(**)	,833(**)	,997(**)	,913(**)	,612(**)	-,517(*)	
	Sig. (bilateral)	,144	,241	,018	,018	,140	,064	,050	,011	,000	.	,001	,000	,000	,000	,000	,000	,003	,016	
Na (meq/100g)	Pearson	-,092	,828(**)	,537(*)	,537(*)	,037	,088	,096	,574(**)	,301	,675(**)	1	,842(**)	,445(*)	,245	,646(**)	,840(**)	,983(**)	,040	
	Sig. (bilateral)	,693	,000	,012	,012	,873	,703	,680	,007	,186	,001	.	,000	,043	,284	,002	,000	,000	,862	
K (meq/100g)	Pearson	,015	,520(*)	,689(**)	,689(**)	,333	-,053	-,079	,715(**)	,607(**)	,903(**)	,842(**)	1	,713(**)	,553(**)	,875(**)	,993(**)	,765(**)	-,166	
	Sig. (bilateral)	,949	,016	,001	,001	,141	,818	,733	,000	,004	,000	,000	.	,000	,009	,000	,000	,000	,472	
SB (%)	Pearson	,437(*)	,054	,310	,310	,321	-,666(**)	-,690(**)	,325	,987(**)	,929(**)	,445(**)	,713(**)	1	,975(**)	,949(**)	,743(**)	,400	-,764(**)	
	Sig. (bilateral)	,047	,817	,171	,171	,155	,001	,001	,150	,000	,000	,043	,000	.	,000	,000	,000	,070	,000	
SCa (%)	Pearson	,490(*)	-,133	,202	,201	,340	-,751(**)	-,777(**)	,206	,998(**)	,833(**)	,245	,553(**)	,975(**)	1	,862(**)	,586(**)	,207	-,843(**)	
	Sig. (bilateral)	,024	,566	,381	,381	,132	,000	,000	,369	,000	,000	,284	,009	,000	.	,000	,005	,368	,000	
SMg (%)	Pearson	,372	,243	,451(*)	,451(*)	,297	-,477(*)	-,497(*)	,482(*)	,893(**)	,997(**)	,646(**)	,875(**)	,949(**)	,862(**)	1	,893(**)	,591(**)	-,578(**)	
	Sig. (bilateral)	,096	,288	,040	,040	,190	,029	,022	,027	,000	,000	,002	,000	,000	,000	.	,000	,005	,006	
SK (%)	Pearson	,055	,535(*)	,608(**)	,608(**)	,257	-,138	-,163	,636(**)	,636(**)	,913(**)	,840(**)	,993(**)	,743(**)	,586(**)	,893(**)	1	,780(**)	-,244	
	Sig. (bilateral)	,814	,012	,003	,003	,260	,550	,480	,002	,002	,000	,000	,000	,000	,005	,000	.	,000	,286	
SNa (%)	Pearson	-,063	,863(**)	,381	,381	-,115	,016	,031	,427	,257	,612(**)	,983(**)	,765(**)	,403	,207	,591(**)	,780(**)	1	-,008	
	Sig. (bilateral)	,786	,000	,088	,088	,620	,944	,895	,053	,262	,003	,000	,000	,070	,368	,005	,000	.	,971	
SAI (%)	Pearson	-,682(**)	,196	,350	,350	,131	,986(**)	,994(**)	,349	-,812(**)	-,517(*)	,040	-,166	-,764(**)	-,843(**)	-,578(**)	-,244	-,008	1	
	Sig. (bilateral)	,001	,395	,120	,119	,572	,000	,000	,121	,000	,016	,862	,472	,000	,000	,006	,286	,971	.	
	N	21	21	21	21	21	21	21	21	21	21	21	21	21	21	21	21	21	21	21

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

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

5.3 EVALUACIÓN CUALITATIVA DE LA PRESENCIA DE ALÓFANOS EN LAS MUESTRAS COMPUESTAS

Con base en los resultados obtenidos anteriormente para las muestras de suelo, se infiere la presencia de alófanos, razón por la cual se realiza una prueba cualitativa para evaluar su presencia. Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 19, encontrándose su presencia en todos los suelos estudiados.

Tabla 19 Resultados de pH del suelo prueba cualitativa de presencia de alófanos

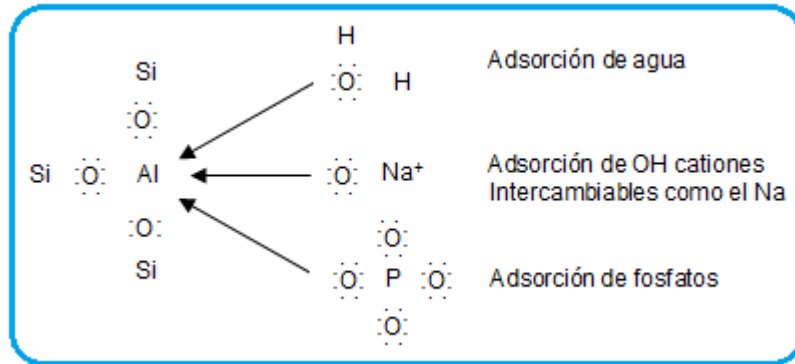
Muestra	pH (suelo: NaF _(1N)) (1:50)	Presencia de Alófanos
Bosque	11,1	+
Bosque I	11,29	+
Bosque II	11,44	+
Potrero I	11,23	+
Potrero II	11,39	+
Potrero III	11,42	+
Cultivo	10,96	+

Las propiedades del alófano son controladas por la estructura y la forma de las partículas de alófano, la gran área superficial y los grupos químicos presentes en la superficie. La mayoría de los grupos reactivos son probablemente los grupos $\text{Al}(\text{OH})^{+2}$, $\text{Al}(\text{OH})_2^+$, $\text{Al}(\text{OH})_4^-$; las propiedades de cambio de este mineral dependen del pH del medio, en un medio fuertemente ácido predominan las cargas positivas del sistema y el material presenta una fuerte adsorción de aniones, con adsorción despreciable de cationes lo que confirma aún más la retención de fósforo por parte de estos compuestos que contribuye a la baja disponibilidad de este nutriente para los suelos estudiados.^[22] Estudios realizados en Andisoles de Ecuador y Colombia demuestran que la fijación de P está directamente relacionada con el contenido de C en el suelo en la formación de complejos humus–Al e indirectamente, esto mostraría cuales minerales arcillosos se formarían a partir de la ceniza volcánica en determinadas condiciones así como la intensidad de la fijación de P. Aparentemente los suelos alofánicos tienden a fijar menos P.^[87] Una representación esquemática de la adsorción por alófano se observa en la Figura 33.

El alófano es un fuerte adsorbente de sustancias orgánicas principalmente por fuerzas de Van der Waals, retrasando la degradación de sustancias orgánicas, como lo demuestra la acumulación de MO en los suelos; ^[22] aspecto que influye negativamente en el suelo, si la mineralización de los compuestos orgánicos se

hace muy lenta, genera más acidez e impide la actividad enzimática, causando serias deficiencias de nutrientes como se mencionó con anterioridad, afectando el óptimo desarrollo de cultivos.

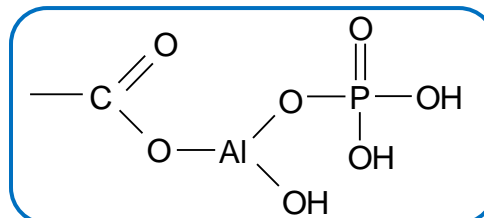
Figura 33. Representación esquemática de la adsorción por alófanos



Fuente: Campo.E.,2006

Con los resultados de la Tabla 19 se fortalece el hecho de que las muestras de los suelos presentan alófanos ya que el valor de pH en NaF es superior a 9,4. Se puede además inferir que las pasturas y bosques muy probablemente presentan mayor cantidad de alófanos, ya que su valor de pH en este medio es superior al del cultivo en las muestras de suelo; esto reafirma los datos obtenidos de las propiedades físicas y químicas para estos suelos como su baja densidad, alta capacidad de retención de fosfatos, dada la formación de complejos humus-alumino fosfatos (Figura 34). La menor presencia de alófanos en el suelo de cultivo se podría atribuir al incremento de la MOS por la aplicación de abonos orgánicos, que podría enmascarar la presencia de estos compuestos.

Figura 34. Representación esquemática de la fijación de fósforo en los complejos humus-Al



Fuente: Sollins. 1991.

5.4 CARACTERIZACIÓN DE HOJARASCA PROVENIENTE DE LOS SUELOS DE BOSQUE

Con el objeto de estudiar el aporte de la hojarasca presente en los suelos de Bosques a la MOS se evalúan algunas propiedades físicas y químicas en ellas. Sus resultados se presentan en la Tabla 20.

Tabla 20. Resultados de la caracterización de la hojarasca de Bosque

Bosque	Muestra	HH	pH	%CO	%MO	%N	C/N
	1	9,13	5,18	33,16	57,17	1,89	17,56
	2	9,12	5,08	26,06	44,93	1,17	22,23
	3	8,14	4,91	32,14	55,40	1,52	21,08
	4	10,38	5,19	30,33	52,29	1,58	19,20
	5	9,89	5,21	36,19	62,39	1,42	25,40
	6	10,48	4,63	23,14	39,89	1,30	17,82
	7	9,10	4,5	29,92	51,58	1,43	20,90
	8	11,31	4,73	30,77	53,04	1,44	21,30
	9	7,89	5,07	31,35	54,05	1,30	24,14
	10	8,71	4,75	33,40	57,58	1,15	29,14
	11	8,10	4,78	28,06	48,38	1,14	24,61
	12	11,45	4,16	32,13	55,40	1,63	19,66
	13	9,63	4,86	34,41	59,32	1,10	31,25
	14	7,86	4,8	27,85	48,01	1,23	22,66
	15	10,80	4,79	36,17	62,36	1,19	30,39
	16	9,59	5,2	32,27	55,63	1,14	28,27
	17	9,51	4,65	35,38	60,99	1,07	33,01
	18	10,43	4,71	30,52	52,62	1,17	26,07
	19	11,01	4,53	36,46	62,85	1,44	25,35
	20	8,21	4,87	18,10	31,20	0,98	18,39
	21	10,31	4,63	31,04	53,51	1,56	19,91
	22	8,88	4,77	30,39	52,40	1,31	23,18
	23	7,24	4,55	29,64	51,10	1,27	23,26
24	9,41	4,52	26,33	45,39	1,32	20,02	
25	8,90	4,8	27,57	47,53	1,33	20,76	

Bosque I	Muestra	HH	pH	%CO	%MO	%N	C/N
	26	10,70	4,86	25,69	44,28	1,30	19,81
	27	9,91	4,29	32,66	56,31	1,33	24,49
	28	11,17	4,43	36,22	62,44	1,40	25,81
	29	10,72	4,48	30,05	51,80	1,24	24,18
	30	5,61	4,3	22,57	38,91	1,41	15,96
	31	10,39	4,15	24,41	42,07	1,53	16,00
	32	9,50	4,75	23,10	39,82	1,81	12,78
	33	10,54	4,63	25,04	43,16	1,73	14,49
	34	12,29	4,44	25,95	44,74	1,81	14,31
	35	5,50	4,68	20,43	35,22	1,23	16,56
	36	6,07	4,54	20,45	35,26	1,22	16,72
	37	11,97	4,45	30,21	52,07	1,57	19,25
	38	9,15	4,37	27,17	46,85	1,33	20,39
	39	8,90	4,19	26,62	45,89	1,54	17,29
	40	16,72	4,27	29,00	50,00	1,98	14,65
	41	13,29	3,63	26,91	46,39	1,91	14,12
	42	8,41	3,77	24,41	42,08	1,49	16,34
	43	10,01	4,79	27,30	47,07	1,50	18,15
	44	9,02	5,05	27,69	47,73	1,37	20,14
	45	8,36	4,77	30,55	52,66	1,62	18,81
	46	6,83	4,65	24,50	42,23	1,18	20,78
	47	17,89	4,75	25,79	44,46	1,25	20,67
	48	4,03	4,69	27,90	48,10	1,02	27,42
49	5,45	4,73	20,71	35,71	1,27	16,30	
50	12,08	4,87	30,98	53,41	1,31	23,61	

Continuación (Tabla 20)

Bosque II	Muestra	HH	pH	%CO	%MO	%N	C/N
	51	9,50	4,81	32,15	55,43	1,85	17,40
	52	7,53	4,92	27,91	48,12	1,78	15,69
	53	5,47	5,51	28,33	48,84	2,02	14,03
	54	13,50	4,65	33,80	58,27	1,37	24,71
	55	9,46	4,79	27,96	48,21	1,83	15,31
	56	7,52	4,54	28,66	49,42	1,87	15,33
	57	8,48	4,5	26,31	45,35	1,74	15,15
	58	8,96	4,65	30,78	53,07	1,65	18,65
	59	8,59	4,93	29,84	51,44	1,82	16,40
	60	7,75	4,68	26,80	46,21	1,75	15,28
	61	8,90	5,02	31,66	54,58	1,72	18,45
	62	5,19	4,73	30,35	52,32	1,61	18,81
	63	8,19	5,15	31,22	53,82	1,56	20,04
	64	9,29	5,01	29,37	50,63	1,53	19,14
65	8,99	5,27	29,28	50,49	1,53	19,14	

HH: Humedad Higroscópica; CO: Carbono Orgánico; MO: Materia Orgánica; N Total: Nitrógeno Total; C/N: Relación Carbono/Nitrógeno

Se aplica un análisis estadístico para saber si existe diferencia significativa entre los datos de los diferentes bosques, sometiendo inicialmente los resultados a una prueba de normalidad de **Shapiro-Will**, demostrándose que se ajustan a la normalidad ($p > 0,05$). Por lo tanto se aplican pruebas paramétricas **Anova** y **Tukey**, considerando como factor o variable independiente el tipo de bosque. Se encuentra que no existe diferencia significativa en la humedad de las diferentes hojarasca, las demás variables si presentan diferencia significativa ($p < 0,05$) (Anexo D Tabla 3). Para saber entre cuáles está la diferencia, se aplica la Prueba Tukey (Anexo D Tabla 4). En la Tabla 21 se resumen los resultados de las comparaciones de las propiedades de los diferentes usos de la prueba antes mencionada.

Se debe resaltar que la descomposición de la hojarasca constituye una vía de entrada de nutrientes al suelo, y es uno de los puntos clave del reciclado de materia orgánica y de nutrientes. Es conocida su utilidad como mejoradora de las condiciones físico químicas y en la regulación del régimen de fluctuación diaria de temperatura del suelo; la hojarasca desempeña también un importantísimo papel hidrológico y antierosivo, atenuando los cambios bruscos de humedad. ^[55]

Tabla 21. Comparación de los promedios de algunas de las propiedades físicas y químicas de las hojarasca de los bosques (Prueba de Tukey)

	Hojarasca Bosque	Hojarasca Bosque I	Hojarasca Bosque II
HH (%)	9,42 ^a	9,78 ^a	8,49 ^a
pH	4,79 ^a	4,50 ^b	4,88 ^a
CO (%)	30,51 ^a	26,65 ^b	29,63 ^a
MO (%)	52,60 ^a	45,95 ^b	51,08 ^a
N Total (%)	1,32 ^b	1,45 ^b	1,71 ^a
C/N	23,42 ^a	18,76 ^b	17,57 ^b

HH: Humedad Higroscópica; CO: Carbono Orgánico; MO: Materia Orgánica; N Total: Nitrógeno Total; C/N: Relación Carbono/Nitrógeno. Letras distintas en forma horizontal difieren significativamente ($p < 0,05$).

Los factores que regulan las tasas de descomposición de la hojarasca se agrupan en tres niveles con mayor importancia el factor climático y la humedad, además de la química de la hojarasca y por último los organismos del suelo; todos estos regulan los procesos de mineralización o humificación, siendo relevante la determinación de la relación C/N que posee el tipo de hojarasca que se halla sobre el suelo.^[14]

Los microorganismos del suelo, representan el componente esencial del sistema biótico en los bosques naturales determinantes en los ciclos biogeoquímicos de los nutrientes. La biota del suelo está influenciada por la calidad y cantidad de material vegetal aportado al suelo, y por las características climáticas que también afectan la abundancia microbiana las especies involucradas y su composición trófica.^[88] En este sentido, la descomposición de la hojarasca se lleva a cabo principalmente por los hongos quienes poseen una mayor habilidad para colonizar y descomponer el material vegetal en medios ácidos..^[53]

El pH muestra que la hojarasca presenta una composición química fuertemente ácida, sin embargo, la relación C/N hace clasificar a las hojarasca de estos tres tipos de bosques como mejorante (< 25) (Tabla 21), compuesta por hojas poco lignificadas y ricas en nitrógeno, demostrando su aporte de MO al suelo.^[53] Por lo que es de gran importancia el conocimiento de la concentración de nutrientes en la hojarasca de las plantas; ya que, los residuos vegetales que se producen sobre la superficie del suelo contribuyen de forma importante en el flujo de los nutrientes.^[55]

También se podría inferir que los microorganismos descomponedores de esta hojarasca podrían predominar los hongos que descomponen más fácilmente materiales a estos valores de acidez fuerte. Hay influencia del pH del suelo en la relación C/N de la hojarasca como se deduce de la correlación positiva y altamente significativa ($0,366^{**}$) entre pH suelo y C/N hojarasca mostrando que esta relación depende en un 36,6 % del pH del suelo, y que otras variables afectan

drásticamente esta relación como por ejemplo el CO de la hojarasca (0,633**). No hay un efecto significativo del pH de la hojarasca en esta relación, demostrando que la actividad de los microorganismos depende principalmente del pH del suelo. Además esta relación C/N de la hojarasca se asocia en forma negativa y altamente significativa (-0,518**) con el COS y con el N del suelo (-0,514**) demostrando que a medida que aumenta la mineralización de la hojarasca disminuye la relación C/N aumentando el COS y el N del suelo. En la hojarasca de bosque esta relación es significativamente superior a la de los otros dos bosques, demostrando que en dicho suelo hay menor contribución por parte de ella a la MOS y esto se comprueba porque el suelo de este bosque presenta menor contenido de CO. Es posible que el efecto de sombra de los árboles impidan una rápida descomposición de la hojarasca por falta de rayos solares que suministren una adecuada temperatura para los microorganismos, además la temperatura del medio incide directamente sobre las poblaciones microbianas y su actividad enzimática asociada, como consecuencia se evita una mayor erosión de estos suelos.^[53]

Tabla 22. Correlaciones de Pearson entre la hojarasca de bosques y el suelo de bosque

		Tipo de Hoj.	HH Hoj. (%)	pH Hoj.	CO Hoj. (%)	MO Hoj. (%)	N Total Hoj. (%)	C/N Hoj
Tipo de Hoj.	Pearson	1	-,125	,018	-,150	-,150	,560(**)	-,525(**)
	Sig. (bilateral)	.	,322	,886	,232	,233	,000	,000
HH Hoj. (%)	Pearson	-,125	1	-,240	,270(*)	,270(*)	,147	,066
	Sig. (bilateral)	,322	.	,054	,030	,030	,244	,601
pH Hoj.	Pearson	,018	-,240	1	,212	,213	-,066	,187
	Sig. (bilateral)	,886	,054	.	,089	,089	,603	,135
CO Hoj. (%)	Pearson	-,150	,270(*)	,212	1	1,000(**)	,043	,633(**)
	Sig. (bilateral)	,232	,030	,089	.	,000	,733	,000
MO Hoj. (%)	Pearson	-,150	,270(*)	,213	1,000(**)	1	,043	,633(**)
	Sig. (bilateral)	,233	,030	,089	,000	.	,732	,000
N Total Hoj. (%)	Pearson	,560(**)	,147	-,066	,043	,043	1	-,726(**)
	Sig. (bilateral)	,000	,244	,603	,733	,732	.	,000
HH Suelo	Pearson	,392(**)	-,163	-,211	-,256(*)	-,256(*)	,010	-,148
	Sig. (bilateral)	,001	,194	,092	,040	,040	,935	,240
pH Suelo	Pearson	-,655(**)	,155	,035	,076	,076	-,424(**)	,366(**)
	Sig. (bilateral)	,000	,218	,783	,547	,547	,000	,003
COS (%)	Pearson	,793(**)	-,192	-,142	-,277(*)	-,277(*)	,445(**)	-,518(**)
	Sig. (bilateral)	,000	,125	,259	,025	,026	,000	,000
MOS (%)	Pearson	,793(**)	-,192	-,142	-,277(*)	-,277(*)	,445(**)	-,518(**)
	Sig. (bilateral)	,000	,126	,259	,026	,026	,000	,000
N Total Suelo (%)	Pearson	,786(**)	-,188	-,149	-,277(*)	-,276(*)	,438(**)	-,514(**)
	Sig. (bilateral)	,000	,134	,235	,026	,026	,000	,000
C/N Suelo	Pearson	-,257(*)	,030	,053	,130	,130	-,132	,212
	Sig. (bilateral)	,039	,814	,672	,301	,302	,293	,090
	N	65	65	65	65	65	65	65

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

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

5.5. EVALUACIÓN DEL GRADO DE MINERALIZACIÓN Y HUMIFICACIÓN DE LOS SUELOS

Se evaluó el grado de mineralización y de humificación de la MOS mediante la relación C/N y mediante los diferentes índices de humificación respectivamente.

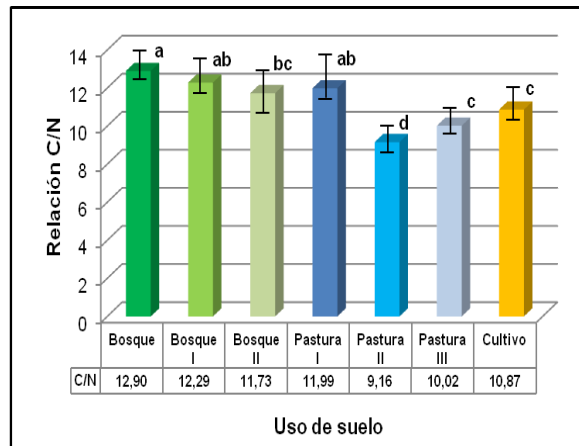
5.5.1 Efecto del cambio de uso de suelo sobre el grado de mineralización: Inicialmente se determinó la relación C/N en las 165 muestras de todos los usos y posteriormente en las muestras compuestas. En la Figura 35 y 37, Tabla 23 se relacionan los promedios y sus diferencias significativas respectivamente (Prueba de U Man Whitney y Prueba de Tukey).

Tabla 23. Comparación de los promedios de la relación C/N de las muestras y de las muestras compuestas

	Bosque	Bosque I	Bosque II	Pastura I	Pastura II	Pastura III	Cultivo
C/N (165 muestras)	12,90 ^a	12,29 ^{ab}	11,73 ^{bc}	11,99 ^{ab}	9,16 ^d	10,02 ^c	10,87 ^c
C/N (Compuestas)	13,32 ^b	12,84 ^c	10,85 ^e	11,98 ^d	9,95 ^f	10,27 ^e	13,77 ^a

C/N: Relación Carbono/Nitrógeno. Letras distintas en forma horizontal difieren significativamente ($p < 0,05$).

Figura 35. Promedios de la relación C/N en las muestras

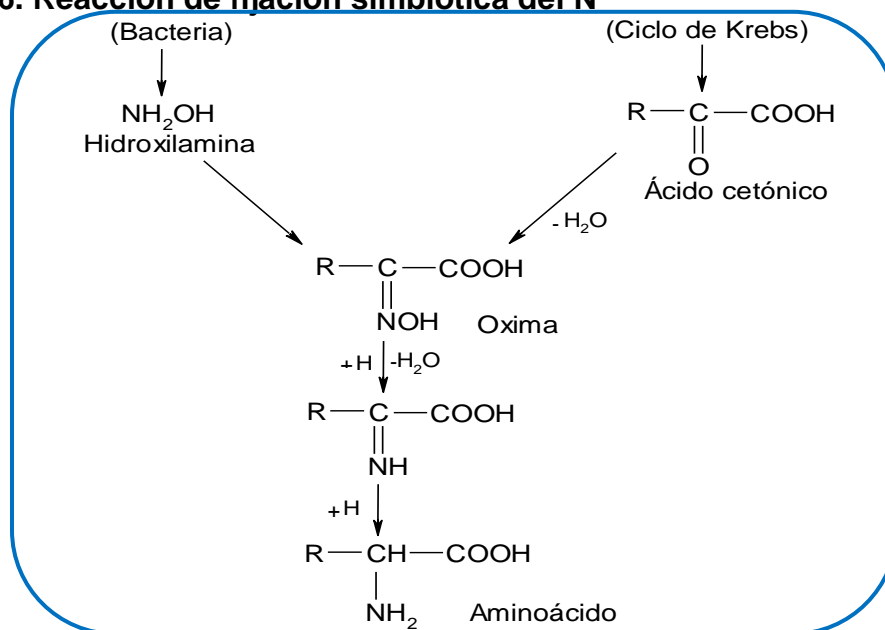


Reviste mayor importancia la relación C/N que los contenidos individuales de los dos elementos, porque esta relación muestra más la actividad bioquímica y el proceso de mineralización de la MOS, dando una idea de los procesos que están regulando el estado del N en el suelo y se constituye en un indicador de la fertilidad del suelo; ^[22, 61] se considera un rango óptimo entre 10–14 para suelos agrícolas. Gran parte de estos suelos analizados presentan un valor normal de esta relación (Figura 35, Tabla 23) con excepción de pastura II.

Estos resultados demuestran que aún cuando los niveles de CO son altos, lo que significaría un baja tasa de mineralización, como se ha manifestado anteriormente, habría suministro de N por procesos de fijación simbiótica que incrementan los niveles de N en forma mineral directamente asimilable por las plantas y los microorganismos, encontrándose estudios donde la tasa de mineralización de la materia orgánica del suelo depende sobre todo de la temperatura y de la disponibilidad de oxígeno, el uso de la tierra, los sistemas de cultivo así como del manejo del suelo y de los cultivos.^[24]

La fijación no podría ser asimbiótica porque necesitaría para ello una fuente de energía que es la MOS y esta no disminuye en los suelos. La mayor fijación simbiótica se presentaría en los suelos de Pastura II (pasto kikuyo); en trabajos reportados se encontró microorganismos fijadores en suelos con arvenses y pastos de este tipo.^[89] Ejemplo entre los que se puede citar los del género *Beijerinckia* y *Derxia* que oxidan al N y sintetizan la Hidroxilamina, la cual es reducida por la enzima ferrosa a NH₃ o puede ocurrir otra posibilidad de reacción con ácidos cetónicos (Figura 36).^[22]

Figura 36. Reacción de fijación simbiótica del N

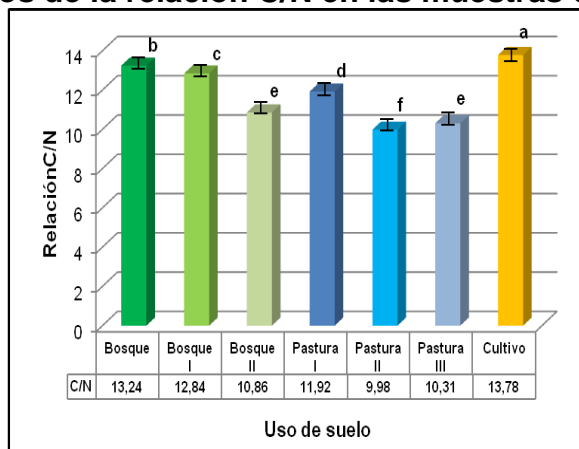


Fuente: Fassbender H; Bornernisza E., 1987

En cuanto a las muestras compuestas la relación C/N (Figura 37 y Tabla 23) está dentro de un rango normal, indicando en principio una mineralización normal de la MOS, con excepción en el suelo de pastura II donde se presenta una alta mineralización. Sin embargo, la acumulación de la MO en la mayoría de los suelos demuestra que no existe una mineralización normal y por el contrario hay

acumulación de MO en estos suelos. Lo que conlleva a concluir que como se explicó anteriormente que existe fijación simbiótica de N en todos los suelos. Además se observa diferencia en el grado de mineralización entre los diferentes usos pero también dentro de un mismo uso como se demostró anteriormente por la diferencia en las condiciones químicas de cada uno de ellos.

Figura 37. Promedios de la relación C/N en las muestras compuestas



5.5.2 Efecto del cambio de uso de suelo sobre el grado de humificación de la

MOS: Para evaluar el grado de humificación inicialmente se realizó el fraccionamiento de la materia orgánica del suelo, con el objeto de separar las sustancias húmicas de la MOF. Estas sustancias húmicas son sustancias que han sido alteradas por acción química o biológica, representan la fracción más activa de la materia orgánica, porque participan en un gran número de reacciones con otras moléculas como: coloides minerales e iones inorgánicos, que son capaces de retener reversiblemente tanto moléculas de agua como otros iones, formando así un complejo denominado humus–alófana o humus–Al, para este tipo de suelos. Se determinaron los siguientes índices:

Tabla 24 Composición porcentual de las fracciones y el grado de humificación de la MOS

	Bosque	Bosque I	Bosque II	Pastura I	Pastura II	Pastura III	Cultivo
%MOH	61,20	78,09	68,27	72,73	66,51	76,12	79,92
%MOF	38,80	21,91	31,73	27,27	33,49	23,88	20,08
MOH/MOF	1,58	3,56	2,15	2,67	1,99	3,19	3,98
RH: (CExt/COT)*100	63,05	62,61	71,73	----	60,00	71,77	78,58

MOH/MOF: Relación Materia Orgánica Humificada y Materia Orgánica Fresca; RH: Relación de humificación.

En la Tabla 24 se observa que en todos los suelos domina la MOH sobre la MOF, lo que se traduce en un alto proceso de humificación. El mayor valor de %MOH, relación MOH/MOF y RH se presenta para el cultivo, lo que indica que se ha llevado a cabo una mayor transformación y mejor proceso de humificación de la MOS, mostrando por ende mayor complejidad estructural de las moléculas en el suelo que la conforman (AH, AF y huminas). El mejoramiento de las condiciones del suelo de cultivo, con incremento en bases de cambio y corrección de la deficiencia de P nutrientes indispensables en el metabolismo de los microorganismos, aplicación de abonos orgánicos maduros, favorecen las condiciones de humificación. Encontrándose estudios donde la aplicación de abonos orgánicos en molisoles de Colombia, beneficia la acumulación parcial de material orgánico y mantiene las condiciones para su transformación.^[90]

Existen diferencias en la calidad de la MOS de diferente uso y dentro del mismo uso; en uso de bosques se observa que el suelo de bosque con menor porcentaje de MO presenta lógicamente menor contenido de MOH. Sin embargo su RH es superior al de bosque I. La diferencia en MOH de los bosques I y II se podría atribuir al valor del pH puesto que los dos tienen contenidos poco diferentes en MO, mientras que el bosque I el valor de pH es significativamente superior al de bosque II, existiendo mejores condiciones de reacción en el primero. El suelo de bosque I presenta la menor relación de humificación porque su contenido de MOF es inferior.

En el uso de pasturas aún cuando la pastura I presenta los menores valores de pH, MO, bases de cambio, su contenido de arcillas es significativamente superior al de las otras dos pasturas, teniendo mayor capacidad para unirse a la MOH impidiendo su pérdida y por esta razón su MOH es superior al de pastura II, pero ésta presenta menor MOH que la pastura III con contenidos muy cercano de MO pero el pH de la pastura III es significativamente superior, lo mismo que el contenido de arcillas, logrando mejores condiciones de humificación.

CONCLUSIONES

- En los suelos Altoandinos analizados de bosque, pastura y cultivo se resalta: baja densidad aparente, textura Franco–Arenosa, bajo contenido de arcillas y alto en arenas, fuerte acidez, pérdida de nutrientes del suelo por procesos de lixiviación o erosión; también se evidencian altos niveles de N, CO y CIC.
- El cambio de uso de suelo de bosque a cultivo disminuye la acidez, el Al intercambiable, incrementando significativamente el valor de pH, la CIC, la disponibilidad de P, bases de cambio, su saturación y el contenido de CO.
- El cambio de uso de bosque a pasturas disminuye la acidez, el Al intercambiable, la CIC y el contenido de C, incrementando significativamente el valor de pH, de Ca y Mg, saturación de bases, la CIC efectiva, y la densidad aparente, con pérdida del horizonte A.
- Dentro del uso de bosque se encuentran diferencias significativas en sus propiedades, la parcela de bosque presenta menor acidez, menor Al intercambiable con valor de pH significativamente superior al de los otros dos bosques, (bosque I y bosque II) que le confieren pérdida significativa de CO y de N e incremento en el valor de la densidad aparente. En el bosque I y II se resalta el superior contenido de Al intercambiable. Las tres parcelas de bosque presentan severa deficiencia de P.
- Dentro del Uso de pasturas existen diferencias significativas en sus propiedades, la parcela de pastura I presenta menor contenido de CO, de N, de bases de cambio y por ende menor CIC que las pastura II y III, Las tres parcelas de pastura presentan severa deficiencia de P.
- La presencia de alófanos y el alto contenido de CO en todos los usos de suelo, demuestra la formación de complejos humus–Al, fuertes retenedores del P reduciendo su disponibilidad y generando fuerte acidez en los suelos.
- La hojarasca de estos bosques se considera mejorante debido a su relación C/N, comprendida entre 17,57 a 23,42 contribuyendo a la entrada de CO y N al suelo.
- Los valores obtenidos para la relación C/N indican que en todos los usos del suelo se lleva a cabo una mineralización adecuada de la MO, sin embargo la acumulación de MO en todos ellos permite suponer que existe un proceso de fijación simbiótica de N.

- En todos los usos de suelos predomina la MOH sobre la libre, demostrando capacidad de los microorganismos para sintetizar sustancias húmicas.
- El suelo de cultivo presenta los valores más altos de la relación MOH/MOF y RH. En todos los usos la RH es superior al 50 % demostrando alto proceso de humificación.
- Se logró hacer una caracterización de suelos Altoandinos de la microcuenca Santa Teresa demostrando su poca fertilidad y suelos de bosque altamente degradados, siendo necesario hacer una reforestación con árboles nativos para evitar pérdidas de suelo y contribuir a disminuir efectos de cambio climático, mejorando las condiciones químicas del suelo previa a la reforestación.
- El cultivo en las condiciones de manejo está óptimo pero en el lapso de tiempo estudiado, no es posible asegurar que de continuar aplicando la carga de fertilizantes y plaguicidas se mantengan estas condiciones adecuadas de conservación. No es conveniente seguir aplicando abonos orgánicos porque los contenidos de MO ya están muy altos.
- En cuanto a las pasturas es necesario mejorar las condiciones de fertilidad y corregir acidez para lograr una mayor productividad y evitar fenómenos de degradación por el pisoteo del ganado. Además sería conveniente recomendar manejo silvopastoril para hacer una ganadería sostenible.

REFERENCIAS

- [1] Manual de manejo de cuencas. Word visión. pág. 9. Pdf
- [2] Consorcio The Louis Berger Group. 2004. Análisis de Escenario de Desarrollo y Plan Indicativo de Ordenamiento Territorial Ambiental de la Región Occidental de la Cuenca del Canal de Panamá. Informe Final del estudio Autoridad del Canal de Panamá. Universidad de Panamá. pág. 185. Pdf
- [3] ALATORRE M. N. La microcuenca como elemento de estudio de la vulnerabilidad ambiental. Centro de Estudios en Geografía Humana. El Colegio de Michoacán. pág. 3. Pdf
- [4]
<http://www.parquesnacionales.gov.co/PNN/portel/libreria/php/decide.php?patron=01.06110737>. Accesado el 9 de enero de 2013. 3:50pm
- [5] CRC. Corporación Autónoma Regional del Cauca. 2006. Plan de Ordenación y Manejo de la Subcuenca Hidrográfica del río las Piedras. pág. 43. Pdf
- [6] ZAMORA CARDONA J. C.; CRISTANCHO F. 2008. La Humedad en las Propiedades Físicas del Suelo. Departamento de Física. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá. pág. 1. Pdf
- [7] CROSARA A. 2007. Génesis del suelo y sus características .Curso de Edafología. Facultad de ciencias. Universidad de la república de Uruguay. pág. 1. Pdf
- [8] MORAL, F.J.; TERRÓN, J.M.; REBOLLO, F.J. 2011. Site-specific management zones based on the Rasch model and geostatistical techniques. Computers and Electronics in Agriculture. pág. 223-230.
- [9] FAO Food and Agriculture Organization of the United Nations. 2006. World reference base for soil resources. A framework for international classification, correlation and communication. World soil resources reports. Rome. pág. 132.
- [10] CRC. 2007. El Cauca Biosostenible, Cartilla Ambiental de la C.R.C. programa de: Educación Ambiental Participación Comunitaria y Comunicaciones. Popayán. pág.12-13.
- [11] IGAC 2009. Instituto geográfico Agustín Codazzi. Estudio general de suelos y zonificación de tierras del departamento del Cauca Escala 1:100.000. Descripción de las características y propiedades de las unidades cartográficas del suelo. pág. 184, 188 pdf
- [12] FAO Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. 2012. Estudio de caracterización del Corredor Seco Centroamericano. Viale delle Terme di Caracalla. Roma, Italia. pág. 26. Pdf
- [13] VARGAS NOGALES R. 2010. Indicadores biológicos para la evaluación de la calidad del suelo. Consejo Superior de Investigaciones Científicas. Granada España. pág. 1. Pdf

- [14] SANCHEZ V. J. 2007. Fertilidad del suelo y nutrición mineral de plantas, conceptos básicos. Fertitec S. A. pág.1. PDF
- [15] ARTIGAS D. 2003. Formación del suelo. Facultad de Agronomía. Departamento de suelos y agua. Universidad de la Republica. pág. 13. Pdf
- [16] RUCKS, L.; GARCIA, F.; KAPLAN; PANCE DE LEON J.; HILL M. 2004. Propiedades físicas del suelo. Departamento de Suelos y Aguas. Universidad de la Republica. Montevideo, Uruguay. pág. 1.PDF
- [17] JARAMILLO D. F. 2002. Introducción a la ciencia del suelo. Facultad de ciencias. Universidad Nacional de Colombia. Medellín. pág. 65, 165, 186, 219, 346, 357. PDF
- [18] MORENO V. A. Relación agua, suelo y planta. Ingeniería Rural. Escuela Universitaria de Ingeniería Técnica agrícola de Ciudad Real. pág. 3. PDF
- [19] IGAC 2006. Metodos analíticos del laboratorio de suelos VI ed. Bogota: Imprenta Nacional de Colombia.
- [20] SINGER M. J., EWING S. 2000. Soil Quality. Handbook of Soil Science. CRC Press. Boca Ratón, Florida. Chapter 11 , editorial Sumner, M. E. pág. 271-298.
- [21] GIRALDO E. 2002. Agroquímica: Un Estudio de los Nutrientes Esenciales en la Producción Agrícola. Universidad del Cauca. Popayán.
- [22] FASSBENDER H., BORNERNISZA E. 1987. Química de los Suelos con énfasis en suelos de América Latina. Instituto Interamericano de Cooperación para la agricultura (IICA). 5ª Edición. Costa Rica. pág. 255
- [23] LEÓN L. A. 2001. Evaluación de la fertilidad del suelo. In Fertilidad de suelos: diagnóstico y control, 2º ed. por F.S. Silva, Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo. Bogotá, Colombia. pág. 155-183.
- [24] ROBERT M. 2002. Captura de C en los suelos para un mejor manejo de la tierra. Organización de las Naciones Unidas para la agricultura y la alimentación (FAO), Roma. pág. 2, 4, 6, 7, 15. PDF
- [25] SAUGIER B., PONTAILLER J. Y. 2006. Carbon global cycle and its consequences on photosynthesis in the Bolivian Altiplano. Ecología en Bolivia, Vol. 41(3): pág. 71-85.
- [26] KENT A. MCVAY Y CHARLES W. RICE. 2002. El carbono orgánico del suelo y el ciclo global del carbono, Departamento de agronomía, Universidad del Estado de Kansas. pág. 1
- [27] IPCC. 2000. Land use, land-use change and forestry special report. Cambridge University Press.377. pág. 2827.
- [28] CERÓN RINCÓN, L., MELGAREJO MUÑOZ, L. M. 2005. Soil Enzymes: Health and Quality Indicators. Acta Biológica Colombiana, Vol. 10 No. 1. pág. 5-16.

- [29] CARVAJAL V. ANDRES F. 2008. Relación del carbono y nitrógeno del suelo con usos y coberturas del terreno en Alcalá, Valle del Cauca. Universidad tecnológica de Pereira. Facultad de ciencias ambientales. Maestría en ecotecnología. Pereira. pág. 17-18, 66.
- [30] BALESIDENT, J., CHENU C., BALABANE M. 2000. Relationship of soil organic matter dynamics to physical protection and tillage. *Soil and Tillage*. pág 215-220.
- [31] RIDRIGUEZ V. A. 2012. Manejo biológico de los suelos. Facultad de ciencias. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá. pág. 1.pdf
- [32] TOFALO R. Edafología resumen VI. Bioquímica y Biología del suelo. pág.1
- [33] ZAGAL E., RODRÍGUEZ N., VIDAL I. Y QUEZADA L. 2002. Actividad microbiana en un suelo de origen volcánico bajo distinto manejo agronómico. *Microbial activity in a volcanic ash soil under different agricultural management*. Chile. pág.1
- [34] SIMPSON, A.J.; SONG, G.; SMITH, E.; LAM, B.; NOVOTNY, E. H.; HAYES, M.H.B. 2007. Unraveling the structural components of soil humin by use of solution-state nuclear magnetic resonance spectroscopy. *Environmental Science Technology*. pág.4, 876-883.
- [35] GALANTINI, J. A. 2002. Contenido y calidad de las fracciones orgánicas del suelo bajo rotaciones con trigo en la región semiárida pampeana. INTA, Argentina. *RIA*. pág. 30, 125–146.
- [36] SIERRA C. Y ROJAS C. La Materia orgánica y su efecto en las características físico químicas y biológicas del suelo. pág. 4
- [37] STEVENSON, F. 1985. Cycles of Soil Carbon, Nitrogen, Phosphorus, Sulfur, Micronutrients. New York, USA: A Wiley-Interscience publication, pág.1-42.
- [38] CASTAÑEDA R. Metodología Actualizada para Determinación de Ácidos Húmicos y Fúlvicos.
- [39] ZAMBONI I. R. C., BALLESTEROS M. Y ZAMUDIO A. M. 2005. Caracterización de ácidos húmicos y fúlvicos de un molisol bajo dos coberturas diferentes. pág. 191-203
- [40] ZABALA F. M. 2003. Evaluación agronómica de sustancias húmicas derivadas de humus de lombriz. Pontificia universidad católica de chile. Facultad de agronomía e ingeniería forestal. Departamento de ciencias vegetales. Santiago de chile.
- [41] BREEMEN. N, BUURMAN. P. 2002. Soil Formation. Laboratory of Soil Science and Geology. Kluwer Academic Publishers, 2ªed. New York, Dordrecht. pág 95-100.
- [42] LOPEZ M. L. 2006. Análisis y caracterización de ácidos fúlvicos y su interacción con algunos metales pesados. Instituto de ciencias básicas e ingeniería. Pachuca de Soto Hidalgo. Mayo Pág 2-7.

- [43] RAMÍREZ C. V., RODRÍGUEZ V. F., BUSTILLOS L. T. 2011. Caracterización y evaluación de ácidos húmicos como biosurfactante, con uso potencial en tratamiento de suelos contaminados con hidrocarburos. Hacia la sustentabilidad: Los residuos sólidos como fuente de energía y materia prima. pág.571-579.
- [44] LOZANO E. S. AREVALOS S. J. LOPEZ A. E. ROMAN M. L. 2009. La aplicación de ácidos húmicos sobre características productivas de *Clitoria ternatea* L. en la región Centro- Occidente de México. AVANCES EN INVESTIGACION AGROPECUARIA. pág. 11-15. HUMICOS
- [45] ARRIECHE I. Comparación de dos métodos de análisis en la determinación de materia orgánica de los suelos Venezuela. pág. 1.
- [46] ARCILA P., FARFAN F., MORENO A., SALAZAR F., HINCAPIE E. 2007. Sistemas de producción de café en Colombia. Federación Nacional de Cafeteros. Cenicafé.
- [47] PERDOMO C.; BARBAZAN M.; Nitrógeno, Área de suelos y aguas. Cátedra de fertilidad facultad de agronomía. Universidad de la Republica. Montevideo Uruguay. pág. 1.PDF
- [48] Manual de Biología. Tercera parte. Universidad de puerto Rico. Departamento de biología. pág. 2,3. Pdf
- [49] Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo centro de investigaciones en ciencias de la tierra. XVII Congreso Nacional de Agroquímica. 4 p. http://books.google.com.co/books?id=c7-YEOy8-°_wC&pg=PA4&dq=Al%C3%B3fano&hl=es&sa=X&ei=8O3cT9LDE4qo8AS1xMWHCw&ved=0CDQQ6AEwATgK#v=onepage&q&f=false. Accesado 22 de marzo de 2012. 4: 56 pm
- [50] CAMPOS C. A., OLESCHKO K., CRUZ H. L., ETCHEVERS J. D. Y HIDALGO C. 2001. Estimación de alófano y su relación con otros parámetros químicos en andisoles de montaña del volcán cofre de perote. Pdf. pág. 16. Terra vol 19 numero 2.
- [51] TURRIALBA. Panel sobre suelos derivados de cenizas volcánicas de latinoamérica. Centro de Enseñanza e Investigación del ICCA. Costa Rica. Julio 1969 http://books.google.com.co/books?id=nMi1HgPHgOwC&pg=PR19&dq=caracteristicas+de+suelos+volcanicos&hl=es&sa=X&ei=cspIUyOyF_fk4APr84DABQ&ved=0CDcQ6AEwAg#v=onepage&q=caracteristicas%20de%20suelos%20volcanicos&f=false. Accesado 22 de marzo de 2012. 6:02pm
- [52] HASHIZUME, H.; THENG, B.K.G. 1999. Adsorption of DL-alanine by allophane: effect of pH and unit particle aggregation. National Institute for Research in inorganic materials, clay minerals. pág 34,233-238.1.
- [53] GELVES P. IVONNE M. 2008. Efecto del uso del suelo sobre la descomposición de hojarasca y grupos funcionales microbianos (cuenca del rio la vieja, Quindío). Microbiología agrícola y veterinaria. Pontificia Universidad Javeriana. Facultad de Ciencias. Bogotá. pág. 8, 12 Pdf.

- [54] LAVADO M.; NUÑEZ E. y ESCUDERO J.C. Variaciones mensuales en el aporte de biomasa. Área de ecología. Facultad de ciencias. Universidad de Extremadura. Badajoz. pág.168. pdf
- [55] GRAMAYO A. W. E. 2002. Almacenamiento de carbono en bosques con manejo forestal sostenible con la reserva de biosfera Maya, Peten, Guatemala. Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza. Turrialba, Costa Rica. pág. 14. PDF
- [56] SÁNCHEZ C. S. Acumulación y descomposición de la hojarasca en un pastizal de *Panicum maximum* Jacq. y en un sistema silvopastoril de *P. máximum* y *Leucaena leucocephala* (Lam.) de Wit. Ing. Instituto de ciencia animal departamento de pastos y forrajes estación experimental de pastos y forrajes "indio hatuey". pág. 8, 9.
- [57] MORETTO A.; LAZZARI A.; FERNANDEZ O. 2005. Calidad y cantidad de nutrientes de la hojarasca y su posterior mineralización en bosque primarios y bajo manejo con distintos sistemas de regeneración. pág. 1. PDF
- [58] ANTONIO JORDÁN LÓPEZ. 2006. Manual de edafología. Departamento de Cristalografía, Mineralogía y Química Agrícola de la Universidad de Sevilla. Profesor asociado a la E.U.I.T.A CURSO pág.41.
- [59] PORTA J.; M. LÓPEZ-ACEBEDO, M. ROQUERO C. 2003. Edafología para la agricultura y el medio ambiente. 3ª ed, Mundi-Prensa, Madrid. pág.929.
- [60] Ubicación y medidas de control de procesos erosivos de la cuenca del río cauca, departamento del cauca. Convenio CRC – CIAT No. 1009-211204 Abril de 2007. pág. 51-52.
- [61] ACOSTA Y.; PAOLINI J.; FLORES S. 2008. Fraccionamiento de metales y materia orgánica en un suelo de la Península de Paraguaná, estado Falcón, Venezuela Multiciencias, vol. 8. pág. 39-47.
- [62] ACOSTA, Y., PAOLINI, J. Y BENÍTEZ, E. 2004. Índice de humificación y prueba de fitotoxicidad en residuos orgánicos de uso agrícola potencial. Revista Facultad de Agronomía (LUZ) 21(4): pág 185-194.
- [63] SENESI, N. 2002. Calidad de las sustancias húmicas presentes en los desechos orgánicos y sus efectos sobre las sustancias nativas del suelo. Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo. Suelos ecuatoriales. Volumen 32, número 2. pág. 142-154.
- [64] MOSQUERA, C.; BRAVO, I. 2006. Comportamiento de los ácidos húmicos en medio básico. En: Suelos Ecuatoriales. vol. 36, no. 1, pág. 36-42.
- [65] JARAMILLO J. D. Índices caracterización de la materia orgánica del horizonte superficial de un andisol hidromórfico del oriente antioqueño (Colombia). Ciencias de la tierra. pág. 23-33
- [66] PEARSON T., WINROCK S., BROWN S. 2000. Sourcebook for Land use, land-use change and forestry project.

- [67] CARBONELL, J. 2007. Agricultura específica por sitio y su importancia en la sostenibilidad del cultivo de la caña de azúcar. Suelos Ecuatoriales. Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo. ISSN 0562-5351. Vol37 No.1. pág. 1-4.
- [68] BRAVO, I. y GIRALDO, E. 2003. Manual de prácticas de química agrícola: Análisis de suelos. Departamento de Química. Universidad Del Cauca. Popayán.
- [69] BRAVO I.; MANRIQUEZ L.; POTOSÍ, S. 2008. Fraccionamiento del fósforo y correlación con la materia orgánica en dos suelos del departamento del Cauca. Suelos Ecuatoriales. Volumen 37, número 2. pág. 147-154.
- [70] MORENO M., SUAREZ M. 2009. Estudio de la influencia de la materia orgánica humificada de un Andisol en los departamentos del cauca y valle del cauca con diferentes sistemas de producción en la retención de fósforo. Trabajo de grado (Químico).Universidad del Cauca. Popayán.
- [71] MOSQUERA C. 2006.Caracterización Preliminar de la Estructura de los Ácidos Húmicos de un suelo Andisol del Departamento del Cauca. Trabajo de grado (Químico). Universidad del Cauca. Popayán.
- [72] MOSQUERA, C.; BRAVO, I.; HANSEN, E. 2007. Comportamiento Estructural de los ácidos húmicos obtenidos de un suelo Andisol del Departamento del Cauca. En: Revista Colombiana de Química. Vol. 36, no. 1, pág. 31-41.
- [73] CABRALES E. M., FERRER J., HERNÁNDEZ R. M. 2011. Fraccionamiento químico de la materia orgánica en tres suelos de la colonia Tovar. Venezuela
- [74] SILVA F. 2000. Fundamentos para la interpretación de análisis de los suelos, plantas y aguas de riego. Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo. Tercera edición. ISBN.
- [75] EPA, 1998. Fate, Transport and Transformation Test Guidelines. OPPTS 835.1220. 1998. OECD Guidelines for the Testing of Chemicals. Sediment and Soil Adsorption/Desorption Isotherm
- [76] BERMUDEZ J. 2007. Conservación de los recursos naturales para una Agricultura sostenible. Manejo de la humedad del suelo. Universidad de México. pág 10, 12
- [77] SEGARPA. Abonos Orgánicos. Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación. Subsecretaria de desarrollo rural. Dirección general de apoyos para el desarrollo rural. pág 2
- [78] BERNIER R., ALFARO M. 2006 Acidez de los Suelos y Efectos del Encalado. Instituto de Investigaciones agropecuarias. Chile
- [79] REICHE C. A. Determinación de la fijación de fósforo y potasio en un suelo joven y un suelo evolucionado del Valle de Cantarranas, Francisco Morazán, Honduras. Ingeniería agronómica. Zamorano, Honduras. Pág 4, 8. PDF

- [80] STEVENSON, F. 1986. Cycles of soil carbon, nitrogen, phosphorus, sulfur, micronutrients. New York, Wiley.
- [81] MARTÍNEZ H. E., FUENTES J. P., ACEVEDO H. E. Carbono orgánico y propiedades del suelo 1 Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Agronómicas, Departamento de Producción Agrícola. Laboratorio de relación Suelo-Agua-Planta. Casilla 1004. Santiago de Chile.
- [82] KOPTA F. 1999. Problematika ambiental con especial referencia a la provincial de cordoba. Fundacion ambiente, cultura y desarrollo ACUDE. Cordoba Argentina.
- [83] PARRA J., ESPINOSA. Acumulación de Pb, Cd y Zn en sedimentos asociados a Rhizophora Mangle, en el río Sevilla, Ciénaga Grande de Santa Marta. Revista Académica Colombiana. 2007. p. 347-354
- [84] COVALEDA S., PAJARES S., GALLARDO J. F., PADILLA J. 2009. Effect of different agricultural management systems on chemical fertility in cultivated tepetates of the Mexican transvolcanic belt b Agriculture, Ecosystems and Environment. pág 129 425.
- [85] GARRIDO V. S. Interpretación de análisis de suelos guía práctica para muestrear los suelos e interpretar sus análisis. Ministerio de agricultura pesca y alimentación secretaria
- [86] VBERNIER R., ALFARO M. 2006. Acidez de los suelos y efectos del encalado. Instituto de investigaciones agropecuarias. Osorno, Chile.
- [87] ESPINOSA J. Suelos Volcánicos, Dinámica del Fósforo y Producción de Papa. pág. 2
- [89] RAMÍREZ H., REYES F., OJEDA N. Actividad biológica del suelo de bosque templado en un transepto altitudinal, Parque Nacional Conguillío (38° S), Chile
- [88] DUARTE B, BRAVO I Y TORRES A **Caracterización de microorganismos solubilizadores de fósforo con respecto a algunas propiedades químicas del suelo en un Agroecosistema asociado de mora de castilla y hortalizas”** Suelos Ecuatoriales Volumen 33 No.2, p 168-174, **2003** Bogotá Colombia ISS 0562-5351.
- [90] LOZANO Z., RIVERO C., BRAVO C., HERNÁNDEZ R. 2011. Fracciones de la materia orgánica del suelo bajo sistemas de siembra directa y cultivos de cobertura Soil organic matter fractions on no-tillage and cover crops systems. Facultad de Agronomía. pág. 28: 35-56.

ANEXOS

ANEXO A. Parámetros de comparación para niveles de fertilidad en suelos de clima medio para suelos de Colombia (SCCS. 2000)

Tabla 1. 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
9,0–9,5	Alcalinidad fuerte
9,5–10,0	Alcalinidad muy fuerte

Tabla 2. Nivel de P por el método de Bray II

Parámetro	Nivel Critico	Disponibilidad
P meq/Kg S (ppm)	15 ppm	Bajo
	15–30 ppm	Medio
	> 30 ppm	Alto

Tabla 3. Nivel de C y MO en suelos de clima frío

Parámetro	Nivel bajo	Nivel medio	Nivel alto
% C	< 2,9	2,9–5,8	> 5,8
% MO	< 5	5–10	> 10

Tabla 4. Nivel de N en suelos de clima frío

Parámetro	Nivel bajo	Nivel medio	Nivel alto
% N	< 0,25	0,25–0,5	> 0,5

Tabla 5. Toxicidad de Al y %SAI al suelo y a las plantas

Parámetro	Nivel bajo	Nivel medio	Nivel alto
Al Int meq/100g S	< 1,5	1,6–3,0	> 3,0
Efectos tóxicos	No tóxico	Moderadamente Tóxico	Tóxico–leguminosas
% SAI	< 30	30-60	> 60
Efectos tóxicos	Generalmente no tóxica	Reduce moderadamente el crecimiento y desarrollo	Reducción severa del crecimiento
Tolerancia planta	Susceptibles	Tolerantes	Muy pocas

Tabla 6. Nivel de CIC para suelos de América Latina

Parámetro	Nivel	Disponibilidad
CIC meq/100g S	<6	Muy débil
	6–10	Débil
	10–20	Normal
	20–30	Elevada
	>30	Muy elevada
CICE meq/100g S	<4	Ocasiona pérdidas por lixiviación.

Tabla 7. Nivel de % SB

Parámetro	Nivel muy bajo	Nivel bajo	Nivel medio	Nivel alto	Nivel muy alto
% SB	< 15	16–35	36–50	51–75	> 76
% SBE		< 16	16–35	> 35	

Tabla 8. Niveles de disponibilidad de Ca, Mg, K, Na

Parámetro	Nivel bajo	Nivel medio	Nivel alto
Ca meq/100g S	< 3.00	3,00–6,00	> 6,00
Mg meq/100g S	< 1.50	1,50–2,50	> 2,50
K meq/100g S	< 0.15	0,15–0,30	> 0,30
Na meq/100g S	< 1		
% SCa	< 65	65-75	> 75
% SMg	< 10	10-15	> 15
% SK	< 2	2-5	> 5
% SNa	< 15		
% SECa	< 30	30–50	> 50
% SEMg	< 15	15–25	> 25
% SEK	< 2	2–3	> 3
% SENa	< 15		

Tabla 9. Niveles de relación de Ca/Mg y Ca+Mg/K

Parámetro	Nivel bajo	Nivel óptimo	Nivel alto
Ca/Mg	2	2–5	5
Ca+Mg/K	< 18	18–40	> 70

ANEXO B. Resultados estadísticos para los análisis de las 165 muestras

Tabla 1. Pruebas de normalidad para las propiedades físicas y químicas

	Uso Suelo	Shapiro-Wilk				Uso Suelo	Shapiro-Wilk		
		Estadístico	gl	Sig.			Estadístico	gl	Sig.
HH (%)	Cultivo	,962	25	,456	Da (g/cm ³)	Cultivo	,978	25	,842
	Bosque	,909	25	,029		Bosque	,849	25	,002
	Bosque I	,793	25	,000		Bosque I	,952	25	,278
	Bosque II	,976	15	,934		Bosque II	,850	15	,018
	Pastura I	,946	25	,204		Pastura I	,955	25	,326
	Pastura II	,944	25	,179		Pastura II	,957	25	,357
	Pastura III	,869	25	,004		Pastura III	,860	25	,003
Arenas (%)	Cultivo	,841	25	,001	Arcillas (%)	Cultivo	,776	25	,000
	Bosque	,826	25	,001		Bosque	,803	25	,000
	Bosque I	,912	25	,033		Bosque I	,896	25	,015
	Bosque II	,975	15	,922		Bosque II	,861	15	,025
	Pastura I	,956	25	,348		Pastura I	,942	25	,164
	Pastura II	,963	25	,481		Pastura II	,910	25	,030
	Pastura III	,949	25	,236		Pastura III	,925	25	,066
Limos (%)	Cultivo	,906	25	,025	pH	Cultivo	,948	25	,226
	Bosque	,830	25	,001		Bosque	,976	25	,790
	Bosque I	,933	25	,104		Bosque I	,975	25	,782
	Bosque II	,968	15	,823		Bosque II	,957	15	,632
	Pastura I	,964	25	,492		Pastura I	,957	25	,360
	Pastura II	,928	25	,078		Pastura II	,970	25	,649
	Pastura III	,968	25	,607		Pastura III	,880	25	,007
P Disp (mg/Kg)	Cultivo	,977	25	,822	CO (%)	Cultivo	,941	25	,157
	Bosque	,914	25	,037		Bosque	,968	25	,599
	Bosque I	,966	25	,547		Bosque I	,947	25	,219
	Bosque II	,905	15	,114		Bosque II	,975	15	,924
	Pastura I	,940	25	,147		Pastura I	,943	25	,173
	Pastura II	,866	25	,004		Pastura II	,926	25	,069
	Pastura III	,982	25	,913		Pastura III	,984	25	,952
MO (%)	Cultivo	,941	25	,157	N Total (%)	Cultivo	,962	25	,461
	Bosque	,968	25	,599		Bosque	,962	25	,455
	Bosque I	,947	25	,218		Bosque I	,987	25	,978
	Bosque II	,975	15	,924		Bosque II	,953	15	,573
	Pastura I	,943	25	,175		Pastura I	,978	25	,848
	Pastura II	,925	25	,068		Pastura II	,929	25	,083
	Pastura III	,984	25	,951		Pastura III	,970	25	,643
Relación C/N	Cultivo	,909	25	,029					
	Bosque	,693	25	,000					
	Bosque I	,978	25	,837					
	Bosque II	,948	15	,498					
	Pastura I	,993	25	,999					
	Pastura II	,970	25	,640					
	Pastura III	,952	25	,276					

Tabla 2. Prueba de homogeneidad de la varianza para las propiedades físicas y químicas

	Estadístico de Levene	gl1	gl2	Sig.
HH (%)	14,225	6	158	,000
Da (g/cm ³)	4,222	6	158	,001
Arenas (%)	4,413	6	158	,000
Arcillas (%)	8,756	6	158	,000
Limos (%)	4,531	6	158	,000
pH	5,206	6	158	,000
P Disp (mg/Kg)	40,178	6	158	,000
CO (%)	5,343	6	158	,000
MO (%)	5,352	6	158	,000
N Total (%)	2,597	6	158	,020
C/N	2,949	6	158	,009

Tabla 3. Pruebas de U de Mann-Whitney para las propiedades físicas y químicas Estadísticos de contraste^a

	Cultivo y Bosque		Cultivo y Bosque I		Cultivo y Bosque II	
	U de Mann-Whitney	Sig. asintót. (bilateral)	U de Mann-Whitney	Sig. asintót. (bilateral)	U de Mann-Whitney	Sig. asintót. (bilateral)
HH (%)	278,000	,503	77,000	,000	64,500	,001
Da (g/cm ³)	18,500	,000	39,000	,000	19,500	,000
Arenas (%)	141,000	,001	242,000	,168	109,000	,026
Arcillas (%)	88,000	,000	48,000	,000	25,000	,000
Limos (%)	287,000	,620	196,000	,024	160,000	,440
pH	271,000	,420	277,000	,491	1,000	,000
P Disp (mg/Kg)	,000	,000	,000	,000	,000	,000
CO (%)	122,000	,000	162,000	,003	10,000	,000
MO (%)	122,000	,000	162,000	,004	10,000	,000
N Total (%)	43,000	,000	277,500	,497	50,000	,000
C/N	118,500	,000	167,000	,005	120,000	,059
	Cultivo y Pastura I		Cultivo y Pastura II		Cultivo y Pastura III	
HH (%)	249,500	,222	21,000	,000	69,500	,000
Da (g/cm ³)	223,500	,084	171,000	,006	105,500	,000
Arenas (%)	232,000	,116	168,000	,005	144,000	,001
Arcillas (%)	207,000	,039	162,000	,003	231,000	,111
Limos (%)	203,000	,033	201,000	,030	151,000	,002
pH	159,500	,003	308,000	,930	130,000	,000
P Disp (mg/Kg)	,000	,000	,000	,000	,000	,000
CO (%)	224,500	,088	311,500	,985	259,000	,299
MO (%)	224,500	,088	311,000	,977	259,000	,299
N Total (%)	140,500	,001	127,500	,000	174,500	,007
C/N	188,000	,016	151,000	,002	229,000	,105

Continuación (Tabla 3)

	Bosque y Bosque I		Bosque y Bosque II		Bosque y Pastura I	
HH (%)	158,000	,003	127,000	,091	235,500	,135
Da (g/cm ³)	,000	,000	,000	,000	6,500	,000
Arenas (%)	249,500	,221	180,000	,834	115,000	,000
Arcillas (%)	202,500	,033	72,000	,001	218,500	,068
Limos (%)	184,000	,013	181,000	,856	195,500	,023
pH	252,000	,240	7,000	,000	140,500	,001
P Disp (mg/Kg)	277,500	,497	5,000	,000	238,000	,148
CO (%)	53,000	,000	1,000	,000	171,500	,006
MO (%)	53,000	,000	1,000	,000	171,000	,006
N Total (%)	45,000	,000	1,000	,000	144,000	,001
C/N	251,500	,236	109,000	,028	230,000	,109
	Bosque y Pastura II		Bosque y Pasture III		Bosque I y Bosque II	
HH (%)	68,500	,000	138,000	,001	134,000	,135
Da (g/cm ³)	6,000	,000	1,000	,000	133,000	,126
Arenas (%)	279,500	,522	240,000	,159	161,000	,459
Arcillas (%)	227,000	,097	86,500	,000	174,000	,706
Limos (%)	177,500	,009	84,000	,000	153,000	,335
pH	255,000	,264	174,500	,007	19,000	,000
P Disp (mg/Kg)	289,500	,655	253,000	,248	12,000	,000
CO (%)	99,000	,000	63,000	,000	85,000	,004
MO (%)	98,000	,000	63,000	,000	85,000	,004
N Total (%)	5,500	,000	3,500	,000	78,000	,002
C/N	2,000	,000	14,000	,000	161,000	,459
	Bosque I y Pasture I		Bosque I y Pastura II		Bosque I y pasture III	
HH (%)	26,000	,000	105,500	,000	241,500	,168
Da (g/cm ³)	35,500	,000	110,000	,000	89,500	,000
Arenas (%)	160,000	,003	235,500	,135	215,500	,060
Arcillas (%)	133,500	,001	142,000	,001	69,000	,000
Limos (%)	287,000	,621	134,000	,001	46,000	,000
pH	207,000	,041	276,500	,485	148,000	,001
P Disp (mg/Kg)	311,000	,977	257,500	,286	296,000	,749
CO (%)	102,000	,000	144,500	,001	185,500	,014
MO (%)	102,000	,000	145,500	,001	185,000	,013
N Total (%)	142,000	,001	186,500	,014	228,000	,101
C/N	287,500	,628	29,000	,000	87,000	,000
	Bosque II y Pastura I		Bosque II y Pastura II		Bosque II y pasture III	
HH (%)	30,000	,000	43,000	,000	117,000	,049
Da (g/cm ³)	9,000	,000	39,500	,000	24,000	,000
Arenas (%)	87,000	,005	167,000	,567	173,000	,685
Arcillas (%)	93,000	,008	82,000	,003	29,000	,000
Limos (%)	141,500	,199	108,500	,027	78,000	,002
pH	40,500	,000	,000	,000	,000	,000
P Disp (mg/Kg)	,000	,000	,000	,000	,000	,000
CO (%)	3,000	,000	,000	,000	4,500	,000
MO (%)	3,000	,000	,000	,000	4,500	,000
N Total (%)	10,000	,000	132,500	,124	94,000	,009
C/N	172,000	,665	32,000	,000	55,500	,000

Continuación (Tabla 3)

	Pastura I y Pastura II		Pastura I y Pastura III		Pastura II y Pastura III	
HH (%)	1,000	,000	31,000	,000	192,000	,019
Da (g/cm ³)	224,500	,087	149,000	,001	271,500	,425
Arenas (%)	148,000	,001	115,000	,000	296,000	,749
Arcillas (%)	300,000	,808	279,000	,516	247,000	,204
Limos (%)	137,000	,001	81,000	,000	309,000	,946
pH	157,500	,003	71,500	,000	103,500	,000
P Disp (mg/Kg)	228,000	,101	310,000	,961	211,000	,049
CO (%)	184,000	,013	129,500	,000	220,500	,074
MO (%)	184,000	,013	129,500	,000	221,000	,076
N Total (%)	35,500	,000	32,000	,000	228,500	,103
C/N	44,000	,000	100,500	,000	156,500	,002

a Variable de agrupación: Uso de Suelo

ANEXO C. Resultados estadísticos para los análisis de las muestras compuestas

Tabla 1. Pruebas de normalidad para las propiedades físicas y químicas

	Uso Suelo	Shapiro-Wilk				Uso Suelo	Shapiro-Wilk		
		Estadístico	gl	Sig.			Estadístico	gl	Sig.
HH (%)	Cultivo	1,000	3	1,000	Arenas (%)	Cultivo	1,000	3	1,000
	Bosque	,964	3	,637		Bosque	1,000	3	1,000
	Bosque I	,999	3	,935		Bosque I	1,000	3	1,000
	Bosque II	1,000	3	,962		Bosque II	1,000	3	1,000
	Pastura I	,998	3	,915		Pastura I	,964	3	,637
	Pastura II	1,000	3	1,000		Pastura II	1,000	3	1,000
	Pastura III	1,000	3	1,000		Pastura III	,964	3	,637
Arcillas (%)	Cultivo	1,000	3	1,000	Limos (%)	Cultivo	1,000	3	1,000
	Bosque	1,000	3	1,000		Bosque	1,000	3	,983
	Bosque I	1,000	3	1,000		Bosque I	1,000	3	1,000
	Bosque II	1,000	3	1,000		Bosque II	1,000	3	1,000
	Pastura I	1,000	3	1,000		Pastura I	1,000	3	1,000
	Pastura II	1,000	3	1,000		Pastura II	1,000	3	1,000
	Pastura III	1,000	3	1,000		Pastura III	1,000	3	1,000
pH	Cultivo	1,000	3	1,000	P Disp (mg/Kg)	Cultivo	,999	3	,927
	Bosque	1,000	3	1,000		Bosque	,999	3	,927
	Bosque I	1,000	3	1,000		Bosque I	1,000	3	1,000
	Bosque II	1,000	3	1,000		Bosque II	1,000	3	1,000
	Pastura I	1,000	3	1,000		Pastura I	1,000	3	1,000
	Pastura II	1,000	3	1,000		Pastura II	,999	3	,935
	Pastura III	1,000	3	1,000		Pastura III	1,000	3	1,000
CO (%)	Cultivo	1,000	3	1,000	MO (%)	Cultivo	,999	3	,935
	Bosque	,964	3	,637		Bosque	1,000	3	1,000
	Bosque I	1,000	3	1,000		Bosque I	1,000	3	1,000
	Bosque II	,987	3	,780		Bosque II	1,000	3	1,000
	Pastura I	,964	3	,637		Pastura I	1,000	3	1,000
	Pastura II	1,000	3	1,000		Pastura II	1,000	3	1,000
	Pastura III	1,000	3	1,000		Pastura III	1,000	3	1,000

Continuación (Tabla 1)

N Total (%)	Cultivo	1,000	3	1,000	Ac Int (meq/100g)	Cultivo	1,000	3	1,000
	Bosque	1,000	3	1,000		Bosque	1,000	3	1,000
	Bosque I	1,000	3	1,000		Bosque I	1,000	3	1,000
	Bosque II	,964	3	,637		Bosque II	1,000	3	1,000
	Pastura I	1,000	3	1,000		Pastura I	1,000	3	1,000
	Pastura II	1,000	3	1,000		Pastura II	1,000	3	1,000
	Pastura III	1,000	3	1,000		Pastura III	1,000	3	1,000
AI Int (meq/100g)	Cultivo	1,000	3	1,000	SAI (%)	Cultivo	,964	3	,637
	Bosque	1,000	3	1,000		Bosque	,923	3	,463
	Bosque I	1,000	3	1,000		Bosque I	1,000	3	1,000
	Bosque II	,964	3	,637		Bosque II	,987	3	,780
	Pastura I	1,000	3	1,000		Pastura I	1,000	3	1,000
	Pastura II	1,000	3	1,000		Pastura II	,923	3	,463
	Pastura III	1,000	3	1,000		Pastura III	,964	3	,637
SAIE (%)	Cultivo	,989	3	,798	CIC (meq/100g)	Cultivo	1,000	3	1,000
	Bosque	,995	3	,868		Bosque	1,000	3	1,000
	Bosque I	1,000	3	,980		Bosque I	1,000	3	1,000
	Bosque II	1,000	3	1,000		Bosque II	1,000	3	1,000
	Pastura I	1,000	3	,982		Pastura I	,987	3	,780
	Pastura II	,812	3	,144		Pastura II	1,000	3	1,000
	Pastura III	,993	3	,843		Pastura III	,996	3	,878
CICE (meq/100g)	Cultivo	,997	3	,900	SB (%)	Cultivo	,999	3	,948
	Bosque	,964	3	,637		Bosque	,949	3	,567
	Bosque I	,964	3	,637		Bosque I	1,000	3	1,000
	Bosque II	1,000	3	1,000		Bosque II	,997	3	,900
	Pastura I	,996	3	,878		Pastura I	,998	3	,915
	Pastura II	,993	3	,843		Pastura II	,964	3	,637
	Pastura III	,964	3	,637		Pastura III	,987	3	,780
SBE (%)	Cultivo	,993	3	,843	Ca (meq/100g)	Cultivo	1,000	3	1,000
	Bosque	,999	3	,942		Bosque	1,000	3	1,000
	Bosque I	1,000	3	,964		Bosque I	1,000	3	1,000
	Bosque II	,998	3	,922		Bosque II	,964	3	,637
	Pastura I	,992	3	,833		Pastura I	1,000	3	1,000
	Pastura II	,989	3	,797		Pastura II	1,000	3	1,000
	Pastura III	,956	3	,595		Pastura III	,964	3	,637
SCa (%)	Cultivo	1,000	3	1,000	SCaE (%)	Cultivo	1,000	3	1,000
	Bosque	1,000	3	1,000		Bosque	,923	3	,463
	Bosque I	,923	3	,463		Bosque I	,948	3	,562
	Bosque II	,993	3	,843		Bosque II	1,000	3	,983
	Pastura I	,999	3	,927		Pastura I	,998	3	,924
	Pastura II	1,000	3	1,000		Pastura II	,997	3	,898
	Pastura III	,996	3	,878		Pastura III	,992	3	,831
Mg (meq/100g)	Cultivo	,964	3	,637	SMg (%)	Cultivo	1,000	3	1,000
	Bosque	1,000	3	1,000		Bosque	,964	3	,637
	Bosque I	1,000	3	1,000		Bosque I	,923	3	,463
	Bosque II	1,000	3	1,000		Bosque II	,964	3	,637
	Pastura I	1,000	3	1,000		Pastura I	,923	3	,463
	Pastura II	1,000	3	1,000		Pastura II	,923	3	,463
	Pastura III	1,000	3	1,000		Pastura III	,964	3	,637

Continuación (Tabla 1)

SMgE (%)	Cultivo	1,000	3	1,000	Na (meq/100g)	Cultivo	,964	3	,637
	Bosque	,981	3	,736		Bosque	1,000	3	1,000
	Bosque I	,958	3	,607		Bosque I	1,000	3	1,000
	Bosque II	,977	3	,708		Bosque II	1,000	3	1,000
	Pastura I	,907	3	,407		Pastura I	1,000	3	1,000
	Pastura II	,964	3	,637		Pastura II	1,000	3	1,000
	Pastura III	,956	3	,597		Pastura III	1,000	3	1,000
SNa (%)	Cultivo	1,000	3	1,000	SNaE (%)	Cultivo	,977	3	,712
	Bosque	,964	3	,637		Bosque	,934	3	,503
	Bosque I	,964	3	,637		Bosque I	1,000	3	,964
	Bosque II	,923	3	,463		Bosque II	,908	3	,412
	Pastura I	,964	3	,637		Pastura I	,850	3	,241
	Pastura II	,893	3	,363		Pastura II	,871	3	,298
	Pastura III	,923	3	,463		Pastura III	,978	3	,716
K (meq/100g)	Cultivo	1,000	3	1,000	SK (%)	Cultivo	,964	3	,637
	Bosque	1,000	3	1,000		Bosque	,871	3	,298
	Bosque I	,964	3	,637		Bosque I	,987	3	,780
	Bosque II	1,000	3	1,000		Bosque II	,964	3	,637
	Pastura I	1,000	3	1,000		Pastura I	,893	3	,363
	Pastura II	1,000	3	1,000		Pastura II	1,000	3	1,000
	Pastura III	1,000	3	1,000		Pastura III	,923	3	,463
SKE (%)	Cultivo	,949	3	,567	Ca/Mg (meq/100g)	Cultivo	1,000	3	1,000
	Bosque	,976	3	,705		Bosque	,964	3	,637
	Bosque I	1,000	3	,982		Bosque I	,953	3	,583
	Bosque II	,928	3	,482		Bosque II	,964	3	,637
	Pastura I	,926	3	,474		Pastura I	,923	3	,463
	Pastura II	,917	3	,443		Pastura II	,980	3	,726
	Pastura III	,905	3	,400		Pastura III	,974	3	,688
Ca+Mg/K	Cultivo	,951	3	,576	C/N	Cultivo	,980	3	,726
	Bosque	,982	3	,742		Bosque	,803	3	,122
	Bosque I	,996	3	,878		Bosque I	1,000	3	1,000
	Bosque II	,964	3	,637		Bosque II	,999	3	,935
	Pastura I	,828	3	,183		Pastura I	,866	3	,286
	Pastura II	,964	3	,637		Pastura II	,964	3	,637
	Pastura III	,937	3	,515		Pastura III	,824	3	,174

Tabla 2. Prueba de homogeneidad de varianzas para las propiedades físicas y químicas

	Estadístico de Levene	gl1	gl2	Sig.
HH (%)	1,944	6	14	,143
Arenas (%)	3,630	6	14	,022
Arcillas (%)	,000	6	14	1,000
Limos (%)	3,806	6	14	,018
pH	,000	6	14	1,000
P Disp (mg/Kg)	,007	6	14	1,000
CO (%)	1,077	6	14	,422
MO (%)	1,098	6	14	,411

Continuación (Tabla 2)

N Total (%)	,239	6	14	,956
Ac Int (meq/100g)	,000	6	14	1,000
Al Int (meq/100g)	,239	6	14	,956
SAI (%)	,292	6	14	,931
SAIE (%)	1,193	6	14	,365
CIC (meq/100g)	1,546	6	14	,234
CICE (meq/100g)	1,017	6	14	,453
SB (%)	,782	6	14	,598
SBE (%)	2,605	6	14	,066
Ca (meq/100g)	,943	6	14	,496
SCa (%)	,915	6	14	,512
SCaE (%)	1,614	6	14	,216
Mg (meq/100g)	,239	6	14	,956
SMg (%)	,362	6	14	,891
SMgE (%)	,684	6	14	,666
Na (meq/100g)	,239	6	14	,956
SNa (%)	,494	6	14	,802
SNaE (%)	1,322	6	14	,311
K (meq/100g)	,239	6	14	,956
SK (%)	,576	6	14	,744
SKE (%)	1,318	6	14	,312
Ca/Mg (meq/100g)	3,136	6	14	,037
Ca+Mg/K	2,253	6	14	,099
C/N	1,727	6	14	,187

Tabla 3. Anova para las propiedades físicas y químicas

		Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
HH (%)	Inter-grupos	128,483	6	21,414	3810,923	,000
	Intra-grupos	,079	14	,006		
	Total	128,561	20			
Arenas (%)	Inter-grupos	260,621	6	43,437	2935,869	,000
	Intra-grupos	,207	14	,015		
	Total	260,828	20			
Arcillas (%)	Inter-grupos	21,138	6	3,523	35229,429	,000
	Intra-grupos	,001	14	,000		
	Total	21,139	20			
Limos (%)	Inter-grupos	255,349	6	42,558	2796,376	,000
	Intra-grupos	,213	14	,015		
	Total	255,562	20			
pH	Inter-grupos	1,664	6	,277	2773,857	,000
	Intra-grupos	,001	14	,000		
	Total	1,666	20			
P Disp (mg/Kg)	Inter-grupos	9877,227	6	1646,204	261302,294	,000
	Intra-grupos	,088	14	,006		
	Total	9877,315	20			

Continuación (Tabla 3)

CO (%)	Inter-grupos	62,292	6	10,382	12749,926	,000
	Intra-grupos	,011	14	,001		
	Total	62,304	20			
MO (%)	Inter-grupos	185,098	6	30,850	12677,935	,000
	Intra-grupos	,034	14	,002		
	Total	185,132	20			
N Total (%)	Inter-grupos	,700	6	,117	980,080	,000
	Intra-grupos	,002	14	,000		
	Total	,702	20			
Ac Int. (meq/100g)	Inter-grupos	8,240	6	1,373	13732,857	,000
	Intra-grupos	,001	14	,000		
	Total	8,241	20			
Al Int. (meq/100g)	Inter-grupos	7,094	6	1,182	9931,760	,000
	Intra-grupos	,002	14	,000		
	Total	7,096	20			
Al (%)	Inter-grupos	30,756	6	5,126	9526,068	,000
	Intra-grupos	,008	14	,001		
	Total	30,763	20			
SAIE (%)	Inter-grupos	6128,456	6	1021,409	3649,008	,000
	Intra-grupos	3,919	14	,280		
	Total	6132,375	20			
CIC (meq/100g)	Inter-grupos	167,312	6	27,885	33272,348	,000
	Intra-grupos	,012	14	,001		
	Total	167,324	20			
CICE (meq/100g)	Inter-grupos	37,095	6	6,182	5342,877	,000
	Intra-grupos	,016	14	,001		
	Total	37,111	20			
SB (%)	Inter-grupos	243,613	6	40,602	6469,228	,000
	Intra-grupos	,088	14	,006		
	Total	243,700	20			
SBE (%)	Inter-grupos	7479,294	6	1246,549	5643,898	,000
	Intra-grupos	3,092	14	,221		
	Total	7482,386	20			
Ca (meq/100g)	Inter-grupos	30,388	6	5,065	13812,810	,000
	Intra-grupos	,005	14	,000		
	Total	30,393	20			
SCa (%)	Inter-grupos	144,385	6	24,064	11834,829	,000
	Intra-grupos	,028	14	,002		
	Total	144,413	20			
SCaE (%)	Inter-grupos	7628,558	6	1271,426	11750,705	,000
	Intra-grupos	1,515	14	,108		
	Total	7630,072	20			
Mg (meq/100g)	Inter-grupos	1,478	6	,246	2068,800	,000
	Intra-grupos	,002	14	,000		
	Total	1,479	20			
SMg (%)	Inter-grupos	6,378	6	1,063	2566,046	,000
	Intra-grupos	,006	14	,000		
	Total	6,384	20			

Continuación (Tabla 3)

SMgE (%)	Inter-grupos	139,012	6	23,169	894,875	,000
	Intra-grupos	,362	14	,026		
	Total	139,375	20			
Na (meq/100g)	Inter-grupos	,427	6	,071	597,280	,000
	Intra-grupos	,002	14	,000		
	Total	,428	20			
SNa (%)	Inter-grupos	1,743	6	,291	526,014	,000
	Intra-grupos	,008	14	,001		
	Total	1,751	20			
SNaE (%)	Inter-grupos	197,536	6	32,923	999,966	,000
	Intra-grupos	,461	14	,033		
	Total	197,997	20			
K (meq/100g)	Inter-grupos	,434	6	,072	607,080	,000
	Intra-grupos	,002	14	,000		
	Total	,435	20			
SK (%)	Inter-grupos	1,627	6	,271	434,567	,000
	Intra-grupos	,009	14	,001		
	Total	1,635	20			
SKE (%)	Inter-grupos	36,832	6	6,139	71,403	,000
	Intra-grupos	1,204	14	,086		
	Total	38,035	20			
Ca/Mg (meq/100g)	Inter-grupos	50,276	6	8,379	2303,210	,000
	Intra-grupos	,051	14	,004		
	Total	50,327	20			
Ca+Mg/K	Inter-grupos	167,281	6	27,880	1469,588	,000
	Intra-grupos	,266	14	,019		
	Total	167,547	20			
C/N	Inter-grupos	41,797	6	6,966	552,458	,000
	Intra-grupos	,177	14	,013		
	Total	41,974	20			

Tabla 4. Prueba de Tukey^a para las propiedades físicas y químicas

	Uso Suelo	N	Subconjunto para alfa = 0,05						
			1	2	3	4	5	6	7
HH (%)	Bosque	3	13,7833						
	Cultivo	3		14,3400					
	Pastura I	3			14,8467				
	Pastura III	3				18,4500			
	Bosque II	3					18,8033		
	Bosque I	3						19,7167	
	Pastura II	3							19,8500
	Sig.			1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	,364
Arenas (%)	Cultivo	3	68,2700						
	Bosque I	3		70,7600					
	Bosque	3			72,2900				
	Pastura I	3				74,4733			
	Pastura III	3					76,1667		
	Pastura II	3						77,6400	

Continuación (Tabla 4)

	Bosque II	3							78,7400
	Sig.		1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
Arcillas (%)	Bosque I	3	6,7600						
	Bosque II	3		6,8500					
	Pastura II	3			7,5700				
	Bosque	3				7,8800			
	Cultivo	3					8,7200		
	Pastura III	3						8,8100	
	Pastura I	3							9,6800
Sig.			1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	
Limos (%)	Bosque II	3	14,4100						
	Pastura II	3		14,7900					
	Pastura III	3		15,0300					
	Pastura I	3			15,8500				
	Bosque	3				19,8333			
	Bosque I	3					22,4800		
	Cultivo	3						23,0100	
Sig.			1,000	,274	1,000	1,000	1,000	1,000	
pH	Bosque II	3	4,3300						
	Bosque I	3		4,9600					
	Pastura I	3			5,0200				
	Cultivo	3				5,0500			
	Bosque	3					5,1400		
	Pastura II	3					5,1600		
	Pastura III	3						5,2400	
Sig.			1,000	1,000	1,000	1,000	,249	1,000	
P Disp (mg/Kg)	Bosque II	3	5,6400						
	Pastura I	3	5,6900						
	Bosque	3		6,3833					
	Pastura II	3			6,7067				
	Pastura III	3				7,0700			
	Bosque I	3					9,5000		
	Cultivo	3						68,7133	
Sig.			,984	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	
CO (%)	Bosque	3	7,4767						
	Pastura I	3		8,5167					
	Pastura II	3			10,5300				
	Pastura III	3			10,5800				
	Bosque I	3				11,8000			
	Bosque II	3					11,9133		
	Cultivo	3						12,5000	
Sig.			1,000	1,000	,380	1,000	1,000	1,000	
MO (%)	Bosque	3	12,8900						
	Pastura I	3		14,6800					
	Pastura II	3			18,1500				
	Pastura III	3			18,2400				
	Bosque I	3				20,3400			
	Bosque II	3					20,5400		
	Cultivo	3						21,5467	
Sig.			1,000	1,000	,337	1,000	1,000	1,000	

Continuación (Tabla 4)

N Total (%)	Bosque	3	,5600						
	Pastura I	3		,7100					
	Cultivo	3			,9100				
	Bosque I	3			,9200				
	Pastura III	3				1,0300			
	Pastura II	3				1,0600			
	Bosque II	3					1,0967		
	Sig.		1,000	1,000	,911	,054	1,000		
Ac Int (meq/100g)	Pastura III	3	,8300						
	Pastura II	3		,9500					
	Pastura I	3			1,1400				
	Bosque	3				1,1700			
	Cultivo	3					1,2600		
	Bosque I	3						2,3200	
	Bosque II	3							2,5200
	Sig.		1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
AI Int (meq/100g)	Pastura II	3	,6300						
	Pastura III	3	,6500						
	Pastura I	3		,9400					
	Bosque	3		,9600	,9600				
	Cultivo	3			,9900				
	Bosque I	3					2,0200		
	Bosque II	3						2,1467	
	Sig.		,333	,333	,054	1,000	1,000		
SAI (%)	Pastura II	3	1,4533						
	Pastura III	3	1,4567						
	Cultivo	3		2,0933					
	Pastura I	3			2,3400				
	Bosque	3				2,4267			
	Bosque I	3					4,4200		
	Bosque II	3						4,6033	
	Sig.		1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	
SAIE (%)	Pastura III	3	11,9733						
	Pastura II	3	12,9233						
	Cultivo	3		14,6100					
	Pastura I	3			32,8000				
	Bosque	3			33,9500				
	Bosque I	3				53,5567			
	Bosque II	3				54,7800			
	Sig.		,354	1,000	,179	,136			
CIC (meq/100g)	Bosque	3	39,5500						
	Pastura I	3		40,0567					
	Pastura II	3			43,5800				
	Pastura III	3				44,5633			
	Bosque I	3					45,6800		
	Bosque II	3						46,6100	
	Cultivo	3							47,2200
	Sig.		1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000

Continuación (Tabla 4)

CICE (meq/100g)	Bosque	3	2,8267						
	Pastura I	3	2,8633						
	Bosque I	3		3,7667					
	Bosque II	3			3,9200				
	Pastura II	3				4,8933			
	Pastura III	3					5,4333		
	Cultivo	3						6,7667	
	Sig.		,832	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
SB (%)	Bosque II	3	2,9933						
	Bosque I	3	3,1700						
	Bosque	3		4,1933					
	Pastura I	3		4,3033					
	Pastura II	3			9,0400				
	Pastura III	3				10,3300			
	Cultivo	3					11,6533		
	Sig.		,161	,626	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
SBE (%)	Bosque II	3	35,6533						
	Bosque I	3		38,4400					
	Bosque	3			58,6667				
	Pastura I	3				60,1700			
	Pastura II	3					80,5467		
	Cultivo	3					81,3367		
	Pastura III	3						84,7133	
	Sig.		1,000	1,000	1,000	1,000	,424	1,000	1,000
Ca (meq/100g)	Bosque I	3	,2700						
	Bosque II	3		,3867					
	Bosque	3			,6500				
	Pastura I	3				1,0300			
	Pastura II	3					2,7400		
	Pastura III	3						3,0633	
	Cultivo	3						3,0900	
	Sig.		1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	,623
SCa (%)	Bosque I	3	,5933						
	Bosque II	3		,8333					
	Bosque	3			1,6400				
	Pastura I	3				2,5733			
	Pastura II	3					6,2800		
	Cultivo	3						6,5400	
	Pastura III	3							6,8733
	Sig.		1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
SCaE (%)	Bosque I	3	7,1667						
	Bosque II	3		9,9167					
	Bosque	3			22,9567				
	Pastura I	3				35,9867			
	Cultivo	3					45,6400		
	Pastura II	3						55,9767	
	Pastura III	3						56,3767	
	Sig.		1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	,747

Continuación (Tabla 4)

Mg (meq/100g)	Pastura I	3	,2400						
	Bosque I	3	,2700	,2700					
	Bosque	3		,2800	,2800				
	Bosque II	3			,3100				
	Pastura II	3				,5100			
	Pastura III	3					,6900		
	Cultivo	3						1,0067	
	Sig.		,054	,911	,054	1,000	1,000	1,000	
SMg (%)	Bosque I	3	,5867						
	Pastura I	3	,6033						
	Bosque II	3		,6633					
	Bosque	3		,7067					
	Pastura II	3			1,1667				
	Pastura III	3				1,5433			
	Cultivo	3					2,1400		
	Sig.		,945	,195	1,000	1,000	1,000		
SMgE (%)	Bosque I	3	7,1367						
	Bosque II	3		7,8967					
	Pastura I	3			8,4400				
	Bosque	3				9,8667			
	Pastura II	3					10,4100		
	Pastura III	3						12,6733	
	Cultivo	3							14,9200
	Sig.		1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
Na (meq/100g)	Pastura I	3	,2300						
	Pastura II	3		,3000					
	Bosque II	3		,3300					
	Bosque	3			,4200				
	Pastura III	3			,4400				
	Bosque I	3				,5300			
	Cultivo	3					,6867		
	Sig.		1,000	,054	,333	1,000	1,000		
SNa (%)	Pastura I	3	,5733						
	Pastura II	3		,6900					
	Bosque II	3		,7067					
	Pastura III	3			,9933				
	Bosque	3				1,0667			
	Bosque I	3					1,1667		
	Cultivo	3						1,4500	
	Sig.		1,000	,972	1,000	1,000	1,000	1,000	
SNaE (%)	Pastura II	3	6,1467						
	Pastura I	3		8,0233					
	Pastura III	3		8,1467					
	Bosque II	3		8,4000					
	Cultivo	3			10,1333				
	Bosque I	3				14,1433			
	Bosque	3					14,8900		
	Sig.		1,000	,216	1,000	1,000	1,000		

Continuación (Tabla 4)

K (meq/100g)	Pastura I	3	,2200						
	Bosque	3		,3100					
	Bosque II	3			,3700				
	Bosque I	3			,3767				
	Pastura II	3			,3900	,3900			
	Pastura III	3				,4100			
	Cultivo	3					,7200		
	Sig.		1,000	1,000	,333	,333	1,000		
SK (%)	Pastura I	3	,5500						
	Bosque	3		,7833					
	Bosque II	3		,7933					
	Bosque I	3		,8233					
	Pastura II	3			,9000				
	Pastura III	3			,9167				
	Cultivo	3				1,5233			
	Sig.		1,000	,476	,979	1,000			
SKE (%)	Pastura III	3	7,5200						
	Pastura I	3	7,7133						
	Pastura II	3	8,0167						
	Bosque II	3		9,4333					
	Bosque I	3		9,9967	9,9967				
	Cultivo	3			10,6433	10,6433			
	Bosque	3				10,9533			
	Sig.		,416	,286	,169	,843			
Ca/Mg (meq/100g)	Bosque I	3	1,0033						
	Bosque II	3		1,2567					
	Bosque	3			2,3267				
	Cultivo	3				3,0600			
	Pastura I	3					4,2633		
	Pastura III	3						4,4467	
	Pastura II	3							5,3800
	Sig.		1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
Ca+Mg/K	Bosque I	3	1,4333						
	Bosque II	3		1,8867					
	Bosque	3			3,0033				
	Cultivo	3				5,6900			
	Pastura I	3				5,7600			
	Pastura II	3					8,2800		
	Pastura III	3						9,1900	
	Sig.		1,000	1,000	1,000	,995	1,000	1,000	
C/N	Pastura II	3	9,9467						
	Pastura III	3		10,2733					
	Bosque II	3			10,8533				
	Pastura I	3				11,9767			
	Bosque I	3					12,8400		
	Bosque	3						13,3200	
	Cultivo	3							13,7667
	Sig.		1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000

Se muestran las medias para los grupos en los subconjuntos homogéneos.

a Usa el tamaño muestral de la media armónica = 3,000.

ANEXO D. Resultados estadísticos para los análisis de las muestras de hojarasca

Tabla 1. Pruebas de normalidad para algunas propiedades

	Hojarasca	Shapiro-Wilk		
		Estadístico	gl	Sig.
HH (%)	Hojarasca Bosque	,974	25	,737
	Hojarasca Bosque I	,954	25	,307
	Hojarasca Bosque II	,878	15	,044
pH	Hojarasca Bosque	,949	25	,234
	Hojarasca Bosque I	,934	25	,106
	Hojarasca Bosque II	,949	15	,516
CO (%)	Hojarasca Bosque	,932	25	,097
	Hojarasca Bosque I	,973	25	,717
	Hojarasca Bosque II	,985	15	,992
MO (%)	Hojarasca Bosque	,932	25	,097
	Hojarasca Bosque I	,973	25	,720
	Hojarasca Bosque II	,985	15	,993
N Total (%)	Hojarasca Bosque	,955	25	,320
	Hojarasca Bosque I	,948	25	,227
	Hojarasca Bosque II	,978	15	,950
C/N	Hojarasca Bosque	,938	25	,134
	Hojarasca Bosque I	,945	25	,192
	Hojarasca Bosque II	,888	15	,063

Tabla 2. Prueba de homogeneidad de varianzas

	Estadístico de Levene	gl1	gl2	Sig.
HH (%)	6,253	2	62	,003
pH	,820	2	62	,445
CO (%)	1,840	2	62	,167
MO (%)	1,843	2	62	,167
N Total (%)	1,421	2	62	,249
Relación C/N	1,862	2	62	,164

Tabla 3. Anova

		Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
HH (%)	Inter-grupos	15,894	2	7,947	1,424	,248
	Intra-grupos	345,890	62	5,579		
	Total	361,783	64			
pH	Inter-grupos	1,684	2	,842	9,675	,000
	Intra-grupos	5,397	62	,087		
	Total	7,082	64			

Continuación (Tabla 3)

CO (%)	Inter-grupos	198,758	2	99,379	7,269	,001
	Intra-grupos	847,669	62	13,672		
	Total	1046,427	64			
MO (%)	Inter-grupos	591,106	2	295,553	7,274	,001
	Intra-grupos	2519,175	62	40,632		
	Total	3110,281	64			
N Total (%)	Inter-grupos	1,396	2	,698	15,073	,000
	Intra-grupos	2,871	62	,046		
	Total	4,267	64			
C/N	Inter-grupos	414,806	2	207,403	13,881	,000
	Intra-grupos	926,361	62	14,941		
	Total	1341,167	64			

Tabla 4. Prueba de Tukey^{a, b} para algunas propiedades

	Hojarasca	N	Subconjunto para alfa = 0,05	
			1	2
HH (%)	Hojarasca Bosque II	15	8,4880	
	Hojarasca Bosque	25	9,4192	
	Hojarasca Bosque I	25	9,7804	
	Sig.		,195	
pH	Hojarasca Bosque I	25	4,5012	
	Hojarasca Bosque	25		4,7948
	Hojarasca Bosque II	15		4,8773
	Sig.		1,000	,646
CO (%)	Hojarasca Bosque I	25	26,6524	
	Hojarasca Bosque II	15		29,6280
	Hojarasca Bosque	25		30,5112
	Sig.		1,000	,726
MO (%)	Hojarasca Bosque I	25	45,9464	
	Hojarasca Bosque II	15		51,0800
	Hojarasca Bosque	25		52,6004
	Sig.		1,000	,727
N Total (%)	Hojarasca Bosque	25	1,3232	
	Hojarasca Bosque I	25	1,4540	
	Hojarasca Bosque II	15		1,7087
	Sig.		,135	1,000
C/N	Hojarasca Bosque II	15	17,5687	
	Hojarasca Bosque I	25	18,7612	
	Hojarasca Bosque	25		23,4224
	Sig.		,588	1,000

Se muestran las medias para los grupos en los subconjuntos homogéneos.

a Usa el tamaño muestral de la media armónica = 20,455.

b Los tamaños de los grupos no son iguales. Se utilizará la media armónica de los tamaños de los grupos. Los niveles de error de tipo I no están garantizados.