

**EVALUACIÓN DE LA RETENCIÓN DE ALUMINIO POR DOS
FUENTES DE MATERIA ORGÁNICA Y SU CORRELACIÓN CON
EL GRADO DE HUMIFICACIÓN**

GABY MARCELA MUÑOZ GALLEGO

**UNIVERSIDAD DEL CAUCA
FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES, EXACTAS Y DE LA
EDUCACIÓN
DEPARTAMENTO DE QUÍMICA
POPAYÁN
2003**

**EVALUACIÓN DE LA RETENCIÓN DE ALUMINIO POR DOS FUENTES DE
MATERIA ORGÁNICA Y SU CORRELACIÓN CON EL GRADO DE
HUMIFICACIÓN**

GABY MARCELA MUÑOZ GALLEGO

**Trabajo de grado presentado como requisito para optar el título de
Química**

Directora: Mg. ISABEL BRAVO

Asesor: Mg. EFREN GIRALDO

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

Popayán

2003

AGRADECIMIENTOS

A Dios por darme fuerzas para seguir adelante cuando sentía desfallecer

A mi Padre por sus sabias enseñanzas y consejos, donde Dios lo tenga descansando

A mi Madre por su constante ánimo y apoyo durante toda mi vida

A mis Hermanos Julio y José Alberto por su colaboración y entusiasmo

A la profesora Isabel Bravo por su dirección y guía durante el desarrollo de este trabajo

Al profesor Efrén Giraldo por su asesoría y motivación en la terminación de este trabajo

A mis amigas Ana, Carmen, Claudia E, Claudia I, Cristina, Lucia, Berta por demostrarme el valor de la amistad.

A los profesores del departamento de Química por la formación recibida

A mis compañeros del Laboratorio de Agroquímica por su constante ayuda

Al grupo de Química de Productos Naturales por su colaboración durante este trabajo

Y en fin, a muchas personas que me apoyaron de diversas maneras en el desarrollo y culminación de esta etapa de mi vida.

CONTENIDO

		Pág
	INTRODUCCION	16
1.	PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	18
2.	JUSTIFICACION	21
3.	OBJETIVOS	27
4.	FUNDAMENTOS TEORICOS	28
4.1	EXTRACCION DE LAS SUSTANCIAS HÚMICAS	33
4.1.1	Los Acidos Húmicos	35
4.1.2	Los Acidos Fúlvicos	37
4.1.3	Las Huminas	39
4.2	PURIFICACION DE LAS SUSTANCIAS HÚMICAS	39
4.2.1	Purificación de los Acidos Húmicos	39
4.2.2	Purificación de los Acidos Fúlvicos	42
4.3	EVALUACION DEL GRADO DE HUMIFICACIÓN	41
4.3.1	Indices basados en el fraccionamiento de la materia orgánica	41
4.4	ACIDEZ Y MATERIA ORGÁNICA	42
4.4.1	Estiércoles bien descompuestos	43
4.4.2	Compost o abono orgánico artificial	44
4.4.2.1	Factores que deben ser controlados	45
4.4.2.1.1	Temperatura	
4.4.2.1.2	Humedad	
4.4.2.1.3	Aireación	
4.4.2.2	Clasificación de sistemas de compostaje	46
4.4.2.2.1	Sistema abierto	47
4.4.2.2.2	Sistema cerrado	47
5.	METODOLOGÍA	48
5.1	UBICACIÓN GEOGRAFICA	49
5.2	PREPARACIÓN DEL COMPOST Y EL LOMBRICOMPOST	49
5.2.1	Preparación del Compost	

5.2.2	Preparación del Lombricompost	49
5.3	ANÁLISIS FÍSICOS PARA EL COMPOST Y LOMBRICOMPOST	50
5.3.1	Determinación de Humedad	
5.3.2	Evaluación de la Temperatura	
5.4	EVALUACIÓN DEL GRADO DE HUMIFICACIÓN	50
5.4.1	Análisis Químicos	51
5.4.1.1	Determinación del pH	
5.4.1.2	Determinación de la relación C/N	50
5.4.1.2.1	Determinación de la Materia Orgánica	51
5.4.1.2.2	Determinación de nitrógeno por el método de Kjeldahl	52
5.4.1.3	Determinación de la Capacidad de Intercambio Catiónico	53
5.4.2	Separación de la Materia Orgánica Fresca y Materia Orgánica Humificada	54
5.4.3	Extracción de las Sustancias Húmicas	56
5.4.4	Separación de las Sustancias Húmicas	58
5.4.5	Purificación de los Acidos Húmicos	59
5.4.6	Purificación de los Acidos Fúlvicos	61
5.5	EVALUACION DE LA CANTIDAD DE ALUMINIO RETENIDO POR LA MATERIA ORGÁNICA DEL COMPOST Y EL LOMBRICOMPOST	62
6.	ANALISIS DE RESULTADOS	64
6.1	PREPARACION DEL COMPOST	64
6.2	EVALUACIÓN DEL GRADO DE HUMIFICACIÓN DEL COMPOST Y DEL LOMBRICOMPOST	69
6.2.1	Análisis Físicos y Químicos para el Compost maduro	69
6.2.2	Análisis Físicos y Químicos para el Lombricompost maduro	70
6.3	Separación de la Materia Orgánica Fresca y Materia Orgánica Humificada en los dos bioabonos	72
6.4	Análisis Químicos de cada una de las Fracciones	74
6.5	Extracción y Separación de las Sustancias Húmicas en el Compost y Lombricompost	76
6.5.1	En el Lombricompost	77
6.5.2	En el Compost	80
6.6	Purificación de los Acidos Húmicos y Acidos Fúlvicos en el Compost y Lombricompost y evaluación del Índice de Humificación HR ₂	82
6.6.1	En el Lombricompost	85

6.6.2	En el Compost	87
6.7	EVALUACIÓN DE LA CANTIDAD DE ALUMINIO RETENIDO POR LA MATERIA ORGÁNICA DEL COMPOST Y LOMBRICOMPOST	89
7.	CONCLUSIONES	100
	BIBLIOGRAFIA	103
	RECOMENDACIONES	108

INDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Composición Porcentual del Compost	64
Tabla 2. Análisis Químicos y Físicos de los Materiales Compostables	65
Tabla 3. Variación de la Temperatura en °C durante el tiempo de Compostaje	66
Tabla 4. Análisis Químicos y Físicos para el Compost Maduro	69
Tabla 5. Análisis Químicos y Físicos para el Lombricompost Maduro	71
Tabla 6. Distribución del porcentaje de la fracciones en la materia orgánica	73
Tabla 7. Porcentaje de carbono para la materia orgánica fresca y materia orgánica humificada	75
Tabla 8. Efecto del extractante sobre el porcentaje de carbono de ácidos húmicos y el porcentaje de carbono de la fracción fúlvica para el lombricompost	78
Tabla 9. Efecto del extractante sobre el porcentaje de carbono de ácidos húmicos y el porcentaje de carbono de la fracción fúlvica para el compost	80
Tabla 10. Resultados de la purificación secuencial de la fracción fúlvica	83
Tabla 11. Resultados de la purificación secuencial de ácidos húmicos	85
Tabla 12. Efecto del extractante sobre el porcentaje de carbono de ácidos húmicos y el porcentaje de carbono de ácidos fúlvicos para el lombricompost	86
Tabla 13. Efecto del extractante sobre el porcentaje de carbono de ácidos húmicos y el porcentaje de carbono de ácidos fúlvicos para el compost	88

Tabla 14. Análisis del suelo empleado en la evaluación de extracción de aluminio	90
Tabla 15. Extracción de aluminio por la materia orgánica en los diferentes Materiales	91
Tabla 16. Desorción de aluminio por el Suelo sin Materia Orgánica	94
Tabla 17. Resultados de la prueba de Análisis de Varianza para los tratamientos y las Dosis	95
Tabla 18. Tratamientos de aluminio con respecto a la retención	96
Tabla 19. Dosis aplicadas respecto a la retención de aluminio	97
Tabla 20. Resultados de la prueba de Duncan para los tratamientos	98

INDICE DE DIAGRAMAS

	Pág.
Diagrama 1. Proceso de humificación hasta la descomposición completa	19
Diagrama 2. Separación de las diferentes fracciones en la materia orgánica	35
Diagrama 3. Proceso de compostaje aerobio	45
Diagrama 4. Separación granulométrica	55
Diagrama 5. Extracción de las sustancias húmicas	57
Diagrama 6. Separación de los ácidos húmicos y de los ácidos fúlvicos	58
Diagrama 7. Purificación de los ácidos húmicos	60
Diagrama 8. Purificación de los ácidos fúlvicos	62

INDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Formación de quelatos	25
Figura 2. Formación de los precursores húmicos	29
Figura 3. Proceso de formación de las sustancias húmicas	30
Figura 4. Esquema de agregación de arcilla por materia orgánica	36
Figura 5. Estructura hipotética de AH mostrando grupos fenólicos OH, quinonas, N y O como unidades “puente” y grupos COOH en anillos aromáticos	37
Figura 6. Estructura hipotética de los ácidos fúlvicos	38
Figura 7. Gráfica de temperatura durante la preparación del compost	66
Figura 8. Distribución del porcentaje de las fracciones en la materia orgánica	73
Figura 9. Porcentaje de carbono de MOH y MOF para el compost y el lombricompost	75
Figura 10. Efecto del extractante sobre el %Carbono de FF y AH para el lombricompost	78

Figura 11. Efecto del extractante sobre el %Carbono de FF y AH para el compost	80
Figura 12. Efecto del extractante sobre el %Carbono de AH y AF para el lombricompost 86	
Figura 13. Efecto del extractante sobre el %Carbono de AH y AF para el compost	88
Figura 14. Porcentaje de retención de Al por los diferentes materiales	92

ABREVIATURAS

AH: Acidos Húmicos

AF: Acidos Fúlvicos

FF: Fracción Fúlvica

Al: Aluminio

S: Azufre

Ca: Calcio

CSP: Cantidad Suficiente para Completar la Humedad

CIC: Capacidad de Intercambio Catiónico

C: Carbono

CRC: Corporación Regional del Cauca

IGAC: Instituto Geográfico Agustín Codazzi

P: Fósforo

H: Hidrógeno

OH: Hidróxilo

NH₄⁺: Ion Amonio

LRC: Lombriz Roja Californiana

Mg: Magnesio

MO: Materia Orgánica

Mn: Manganeseo

N: Nitrógeno

pH: Potencial de Hidrógeno

C/N: Relación Carbono/Nitrógeno

SH: Sustancias Húmicas

MOH: Materia Orgánica Humificada

MOF: Materia Orgánica Fresca

Relación C/N: Relación Carbono Nitrógeno

INTRODUCCIÓN

En Colombia los estudios sobre acidez tienen gran importancia puesto que con excepción de algunos valles interandinos, la costa atlántica y el desierto guajiro aproximadamente el 85% del territorio nacional corresponde a suelos ácidos, cuyo pH es menor de 5.5 (suelos ICA 1971, IGAC 1988) (1).

A través de numerosas investigaciones, se ha demostrado que el aluminio es el principal componente de la acidez intercambiable en suelos minerales y como tal, es uno de los factores principales que contribuyen al mal desarrollo de las plantas en suelos ácidos o en soluciones nutritivas. El exceso de aluminio en la solución nutritiva disminuye la absorción de fósforo, potasio, calcio, magnesio, azufre, hierro, sodio y boro, produciendo un decrecimiento general en la permeabilidad del protoplasma de las células de las raíces (2).

Con el objeto de disminuir la solubilidad del aluminio, se han utilizado correctivos como el encalado y la materia orgánica (MO) proveniente de distintas fuentes. Se ha establecido que la materia orgánica ejerce un control sobre la actividad del aluminio en la solución del suelo, por la posible combinación de diferentes mecanismos tales como la adsorción sobre su superficie, elevación del pH que genera polimerización y/o precipitación del aluminio. Este efecto se atribuye a los ácidos húmicos (AH). Igualmente se sabe que los ácidos fúlvicos (AF) entran fácilmente en los intersticios de la red cristalina de las arcillas movilizándolo hierro y aluminio, que se vuelven solubles y causan problemas en el suelo, ya que ocasionan acidez y disminución de las bases de cambio (3).

Por esto se requiere continuar las investigaciones para solucionar la acidez causada por el aluminio, puesto que la materia orgánica aplicada puede presentar un contenido de ácidos fúlvicos superior al de ácidos húmicos, generando mayor acidez, por las razones expuestas anteriormente. Por eso, con este trabajo se pretende utilizar materia orgánica proveniente de diferentes materiales (como bobinaza, polvillo de caña, miel de purga, levadura, entre otros) y por distintos métodos con el propósito de determinar cual humus presenta las mejores características físicas y químicas que permitan una mayor retención de aluminio.

Para determinar el grado de humificación se emplearán diferentes parámetros como son el porcentaje de carbono, porcentaje de nitrógeno, relación C/N, porcentaje de humedad, capacidad de intercambio catiónico (CIC), pH, índices de humificación $HR1=CAH/CFF$, $HR2=CAH/CAF$.

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En el Departamento del Cauca la explotación forestal, ganadera y agrícola se ve limitada por la infertilidad de sus suelos, caracterizados por el excesivo grado de acidez, (su valor de pH es generalmente menor o igual a 5.5).

En general, los suelos fuertemente ácidos, (pH menor de 5.5), presentan problemas de manejo que dificultan el desarrollo de una economía exitosa. Entre estos problemas se encuentran la toxicidad del aluminio y/o del manganeso que interfieren en el sistema radicular, impidiendo la división celular y afectando la disponibilidad de elementos esenciales como fósforo, calcio y magnesio. Además, se presenta el fenómeno de fijación de fósforo, que es uno de los problemas más serios de los suelos ácidos y que actualmente impide el desarrollo de grandes zonas arables en el Departamento del Cauca que se encuentran sin uso.

El encalamiento de los suelos agrícolas ha sido una práctica común por varios siglos, para aliviar la toxicidad del Al, debido a que produce un aumento del valor de pH del suelo, y por tanto disminuye la solubilidad del Al precipitándolo como $\text{Al}(\text{OH})_3$, suministra calcio y aumenta la solubilidad de algunos nutrientes. Pero este procedimiento debe realizarse constantemente porque no corrige definitivamente la acidez. Además, en los últimos años se ha encontrado que el encalamiento excesivo causa un efecto negativo en el crecimiento de las plantas y en las propiedades del suelo, porque el calcio en exceso precipita el fósforo, que es indispensable para las plantas, en forma de $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$. El calcio también penetra lentamente hacia el interior del suelo acumulándose en capas más profundas dificultando de esta manera el movimiento o flujo tanto de nutrientes como de agua.

En el suelo el enclamiento excesivo conlleva a la oxidación química de los ácidos húmicos formando nuevamente ácidos fúlvicos. Esto explica, porque en los suelos ácidos y pobres no hay condiciones para una vida microorgánica conveniente, faltando la continuación de la oxidación que, en adelante depende de la presencia de calcio y fósforo. Pero en un suelo alcalino, donde las condiciones de microvida se tornan nuevamente precarias, se produce la oxidación puramente química de los ácidos húmicos, formando nuevamente ácidos fúlvicos, que finalmente son mineralizados por las bacterias. Este proceso se puede apreciar en el diagrama 1 (3).

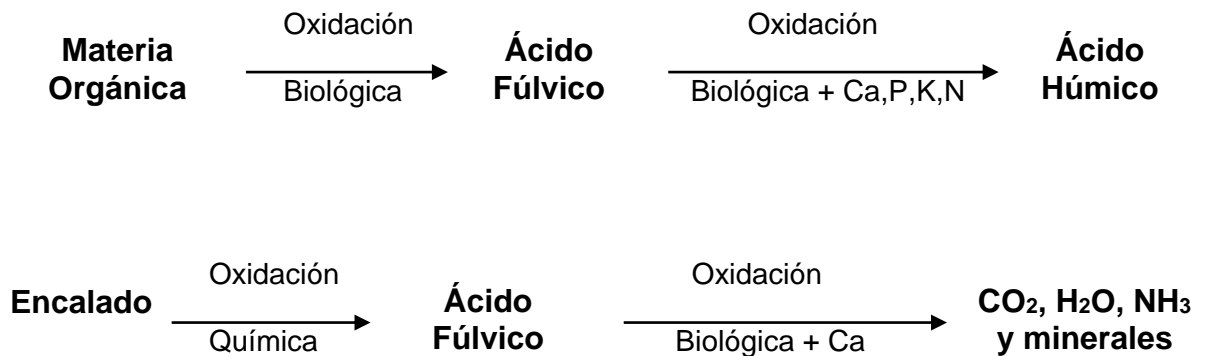


Diagrama 1. Proceso de humificación hasta la descomposición completa

La conversión de ácidos húmicos en ácidos fúlvicos, disminuye el grado de humificación causando problemas al suelo, ya que los ácidos fúlvicos penetran en los intersticios de las láminas de arcillas, extrayendo aluminio de ellas y otros cationes, que pasan a la solución del suelo, produciendo más acidez y empobreciéndolo por pérdida de nutrientes; también causan toxicidad por aluminio, pérdida de la bioestructura, erosión y a largo plazo desertización.

La materia orgánica interacciona con los iones de aluminio desintoxicando los suelos, en forma de complejos de reacción y forma complejos de floculación-

quelación y reacciones de peptización, dando como resultado, una reducción de la concentración del ion aluminio hasta niveles que resultan benéficos para el crecimiento de las plantas. Sin embargo, si se aplica al suelo una materia orgánica que no esté bien humificada, es decir, que presente un grado de humificación bajo, indica que en ésta el contenido de ácidos fúlvicos predomina sobre el de ácidos húmicos; conduciendo así a un problema mayor.

De otro lado uno de los efectos más graves de la acidez del suelo es que impide el apropiado desarrollo de microorganismos como hongos y bacterias, los cuales ayudan a mantener unidos los agregados primarios y secundarios que son los que forman la bioestructura del suelo, ocasionando por lo tanto la pérdida de ésta última y conduciendo así a la erosión del suelo

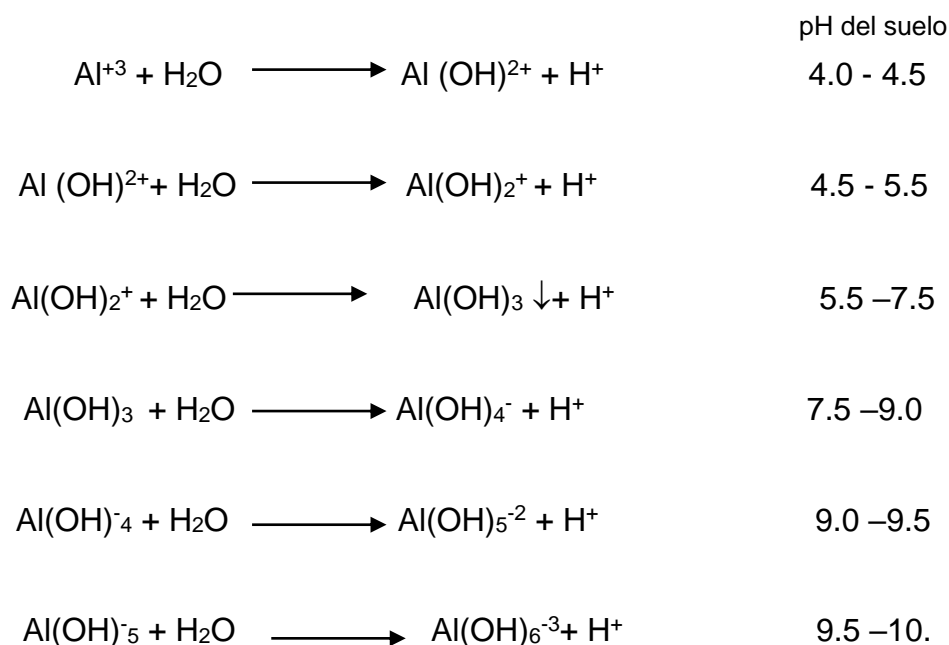
De acuerdo a lo anterior, se plantea como hipótesis de trabajo que al aplicar al suelo materia orgánica bien transformada, ya sea en forma de Compost o Lombricompost, ésta sea capaz de atrapar el aluminio generado, impidiendo así su solubilización o liberación a la solución del suelo y de esta manera evitar la acidez causada por dicho elemento.

2. JUSTIFICACIÓN

Los suelos del Cauca, de origen volcánico presentan alto grado de acidez. El aluminio es el principal componente de la acidez intercambiable. La solubilidad de este elemento y la severidad de su efecto tóxico sobre las plantas, están dados por varios factores del suelo, incluyendo el pH, tipo de arcilla predominante, concentración de otros cationes, concentración total de sales y contenido de materia orgánica. La toxicidad del aluminio generalmente no ocurre en suelos con pH mayor de 5.5, pero ésta es particularmente severa a un pH inferior a este valor, donde el aluminio se vuelve soluble y puede acumularse en concentraciones tóxicas.

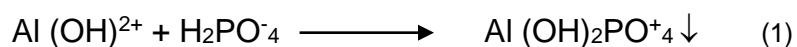
La reactividad del aluminio en suelos ácidos varía disminuyendo en orden desde la forma Al^{+3} soluble en agua a monómeros de OH-Al, hasta formas polimerizadas de hidróxidos de aluminio.

La razón por la cual el Al es causa de acidez en todo el rango del pH en el suelo se muestra en las siguientes reacciones.

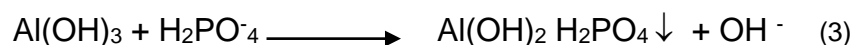


De esta secuencia se puede concluir que la solubilidad del Al es bastante baja dentro del rango de pH de 5.5 a 7.5 donde es precipitado y permanece relativamente insoluble como $\text{Al}(\text{OH})_3$. Por debajo de pH 5.5 y sobre pH 7.5 las concentraciones de Al soluble aumentan rápidamente. A medida que el pH aumenta de 4.0 a 4.5 la solubilidad de Al^{+3} disminuye, mientras que la forma hidrolítica $\text{Al}(\text{OH})^{2+}$ aumenta; en esta última forma es como el aluminio produce efectos adversos sobre el crecimiento de las plantas y específicamente sobre el crecimiento radicular (4).

Como se dijo anteriormente el aluminio ocasiona toxicidad en las plantas, en diferentes formas, se ha señalado que produce precipitación de los fosfatos en el interior de la pared celular y en el suelo. En suelos fuertemente ácidos ($\text{pH} < 5.5$) las principales formas de aluminio son Al^{+3} , $\text{Al}(\text{OH})^{2+}$ y $\text{Al}(\text{OH})_2^+$ que reaccionan con el fósforo por intercambio aniónico o por adsorción precipitando, de acuerdo a las siguientes reacciones (5).



Sin embargo, en suelos con pH mayor a 5.5 el aluminio se presenta en forma de Al(OH)_3 también se presenta intercambio aniónico, el fósforo precipita de acuerdo a la siguiente ecuación.



Esta precipitación provoca la reducción de la concentración y transporte de fósforo en la planta debido a que dicho elemento se precipita sobre la raíz o en sus células, lo que causa su acumulación en la raíz. Este efecto se refleja en la parte aérea por un crecimiento retardado, hojas pequeñas, hojas y vainas de color púrpura, amarillamiento y muerte de ápices (5).

La mayoría de los suelos ácidos son muy evolucionados, pobres en nutrientes, especialmente calcio, magnesio y fósforo. Su caracterización es importante ya que en ellos ocurren variaciones en cuanto a textura, grado de acidez, contenido de calcio, magnesio y aluminio del complejo de cambio, las cuales imposibilitan generalizar prácticas agronómicas tendientes a mejorar su potencialidad para uso tanto agrícola como pecuario (6,7).

Se ha propuesto que la materia orgánica ejerce un control sobre la actividad del aluminio en la solución del suelo por la posible combinación de diferentes mecanismos como: la adsorción sobre su superficie, la elevación del pH que genera polimerización y/o precipitación del aluminio, un defecto de los cationes básicos del material, la formación de complejos con ácidos orgánicos de bajo peso

molecular producidos en la descomposición de la materia orgánica, y la quelación (8).

Los quelatos y su acción (quelación) se establecen debido a la formación de un anillo heterocíclico con unión metálica mediante uniones coordinadas a dos o más átomos no metálicos en la misma molécula. La propiedad más importante de la quelación radica en el hecho de incrementar la estabilidad de enlace entre el átomo metálico y los grupos coordinados que forman el anillo quelante (9).

Los ácidos fúlvicos y húmicos (sustancias similares al humus) son uno de los principales agentes quelantes en los suelos. Estos influyen directamente sobre cationes di y trivalentes, especialmente el aluminio, formando complejos solubles o insolubles dependiendo del grado de saturación. La formación de quelatos se lleva a cabo a través de grupos funcionales tales como COOH, OH fenólicos, y grupos C=O (9). Cuando las sustancias húmicas se encuentran en un medio ácido tienden a ceder parte de sus hidroxilos tanto de sus zonas laterales como del núcleo para neutralizar y su lugar es ocupado por el anión responsable de la acidez. Esto se puede observar en la figura 1.

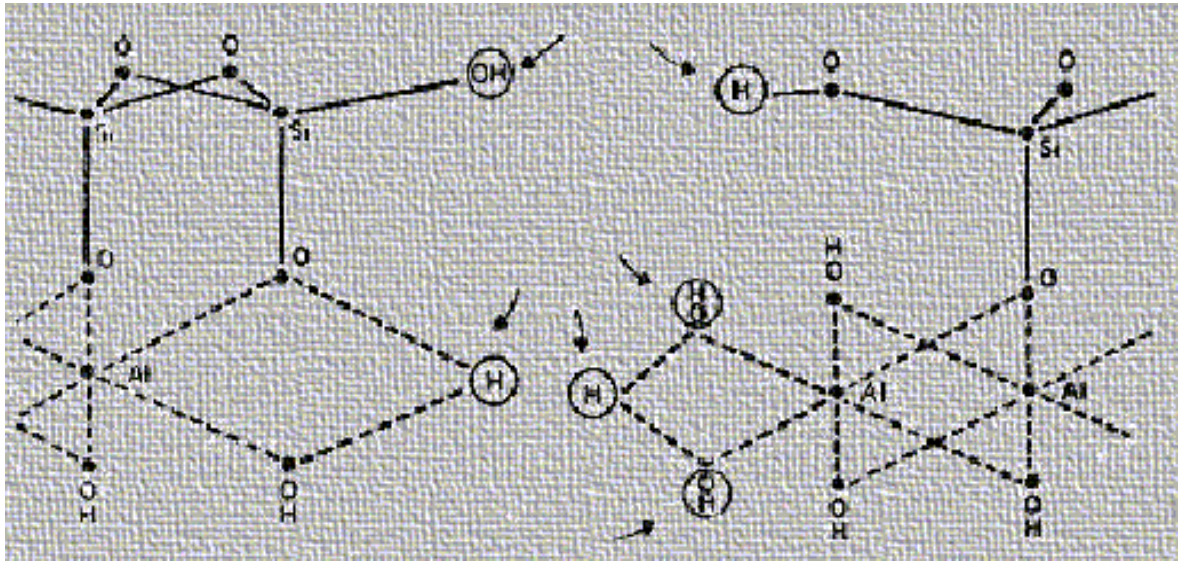


Figura 1. Formación de quelatos

En los últimos años en el departamento del Cauca se están aplicando en forma indiscriminada al suelo, abonos obtenidos mediante el método de compostaje y/o lombricompostaje de bobinaza y otros residuos agropecuarios; sin embargo, estos abonos se aplican sin tener un proceso completo de maduración, lo que implica que el grado de humificación de estos abonos es muy bajo; es decir, que la relación AH/AF es menor que 1 (10,11).

De acuerdo a las consideraciones anteriores, cada vez se están aplicando mayor cantidad de ácidos fúlvicos a los suelos ácidos, y probablemente se está solubilizando más aluminio y bases de cambio que son fácilmente lavadas produciendo más acidez y empobreciendo más al suelo.

Por lo tanto con este trabajo se pretende evaluar: a) El grado de humificación de los bioabonos obtenidos a través de compostaje y lombricompostaje; esto se realizará a los tres meses que es cuando se reporta (10) que estos bioabonos, han

alcanzado un proceso de humificación apropiado. b) La capacidad de retención de aluminio que tienen estos dos bioabonos.

3. OBJETIVOS

GENERAL

Evaluar la relación entre el grado de humificación de materia orgánica proveniente de un lombricompost y de un compost obtenidos a partir de bobinaza, y la retención de aluminio por estos materiales en y sin presencia de suelo.

ESPECIFICOS

- 3.1** Obtener un compost y un lombricompost a partir de bobinaza y otros residuos descritos en la metodología.
- 3.2** Evaluar el grado de humificación de cada uno de los compost en un periodo de tres meses.
- 3.3** Evaluar el porcentaje de aluminio retenido por la materia orgánica de los dos bioabonos (en un sistema acuoso).
- 3.4** Evaluar el porcentaje de aluminio retenido por un suelo de la vereda Chisquío, Municipio del Tambo, Departamento del Cauca, en y sin presencia de materia orgánica y además mezclado con cada uno de los dos bioabonos.

4. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

El suelo es parte de una comunidad simbiótica en la que los seres humanos, las plantas y los animales se proveen de sus necesidades mutuas. Este cuerpo natural puede ser considerado como un sistema de tres fases, compuesto de sólidos, líquidos y gases dispersos para formar una matriz homogénea.

Los suelos minerales, que en la práctica son los suelos agrícolas, tienen en consecuencia cuatro constituyentes de mayor importancia que son los materiales minerales, la materia orgánica (M.O), el agua y el aire.

Al hablar de los procesos bióticos de formación de suelos se considera que los cuatro procesos edafogénicos más importantes que entran en una muestra son la captación de energía y sustancias mediante la fotosíntesis, cuya inversión es la descomposición de los residuos de las plantas, el intercambio de cationes y la formación de compuestos orgánicos y minerales. En este sentido, la materia orgánica es indispensable para el mantenimiento de la micro y meso vida del suelo y es claro que la bioestructura y toda la productividad del suelo se basan en la presencia de materiales orgánicos en descomposición o humificados (12). Esto debido a que la materia orgánica es la fuente de energía para los microorganismos del suelo, a la vez que les suministra los nutrientes esenciales nitrógeno, fósforo, azufre, etc. Igualmente regula la nutrición vegetal, proporciona una estructura estable al suelo al actuar como cemento de unión entre las partículas, dando origen al complejo arcillo-húmico, favorece la retención de humedad por el suelo, incide sobre el balance hídrico y la erosión de los suelos, actúa de amortiguador al moderar los cambios de acidez e inactivar los elementos o compuestos orgánicos tóxicos añadidos al suelo por contaminación, contiene incluso el factor energético

que produce la diferenciación, dentro del suelo, de capas sucesivas que se denominan horizontes (13).

La materia orgánica está constituida por compuestos de origen biológico que se encuentran en el suelo. Estos restos vegetales están constituidos principalmente por sustancias aromáticas cuyos representantes más genuinos son la lignina y los taninos; y por compuestos alifáticos representados principalmente por celulosa y proteínas.

Sobre ellos actúa la microflora del suelo que realiza su mineralización y posterior polimerización y condensación para generar las sustancias húmicas que son compuestos propios del suelo.

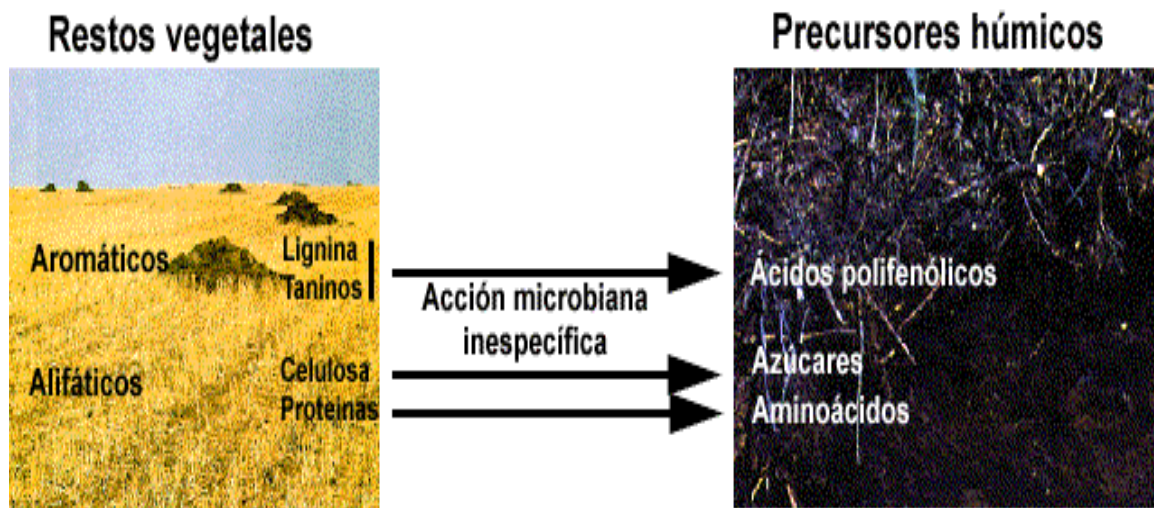


Figura 2. Formación de los precursores húmicos

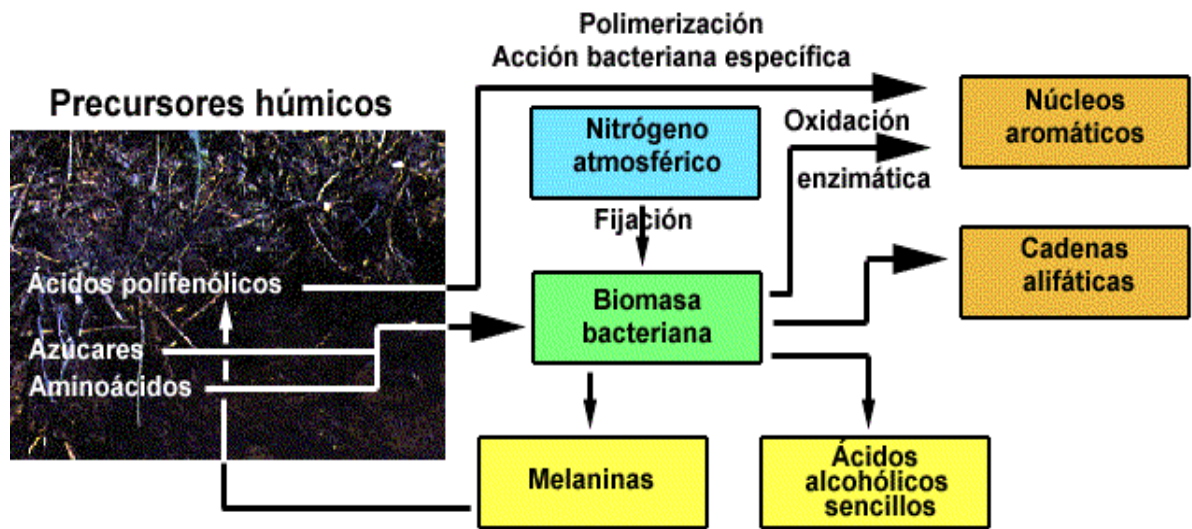


Figura 3. Proceso de formación de las sustancias húmicas

Los compuestos aromáticos, por la acción de bacterias específicas se fragmentan y generan quinonas que son susceptibles de polimerizarse y generar núcleos aromáticos, de masa molecular elevada, que son la base de todas las sustancias húmicas. Sobre estos núcleos aromáticos se insertan cadenas alifáticas, ricas en grupos carboxílicos, amínicos y alcohólicos para generar los ácidos húmicos, fúlvicos y huminas que son los componentes primordiales del humus (14).

Según la recomendación de la Soil Science Society of America, la materia orgánica se define en los siguientes términos: "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". La parte más estable de esta materia orgánica se llama humus, que puede definirse como "la fracción más o menos estable de la materia orgánica que se obtiene después que se ha descompuesto la mayor parte de las sustancias vegetales o animales" (15).

Los ácidos húmicos, fúlvicos y las huminas reciben muchas veces el nombre de sustancias húmicas; las cuales son sustancias amorfas de colores oscuros, polímeros tridimensionales de elevado peso molecular, de carácter ácido, constituidos por unos grupos funcionales: Núcleo (grupos aromáticos nitrogenados, como el indólico y el pirrólico, y grupos bencénicos aromáticos como el naftaleno y el benceno), grupos reactivos (responsables de importantes propiedades de la materia orgánica: hidróxilo carboxilo, amino, metoxilo...) y puentes de unión (nitrilo, amino, cetónicos...) y cadenas alifáticas (16).

Las sustancia húmicas al igual que los compuestos orgánicos promueven la conversión de numerosos elementos hacia formas disponibles y asimilables para las plantas.

La fertilidad de un suelo orgánico se ha relacionado con su contenido en Humus, y esto se debe a las acciones que este material ejerce sobre los factores físicos, químicos y microbiológicos del suelo.

- Efectos Físicos

Las sustancias húmicas contribuyen a la estructura del suelo, por cuanto ellas aparecen usualmente en el humus como una sustancia semejante a un gel. Este gel se combina y recubre las partículas inorgánicas del suelo, para formar agregados muy estables y resistentes a la desintegración. Comúnmente el humus brinda "cuerpo" a los suelos livianos y ayuda a prevenir la compactación en los suelos arcillosos pesados.

Los ácidos húmicos, a través del humus, mejoran la capacidad de retención de agua de los suelos, como resultado de la floculación y agregación de las partículas, aumentando los espacios capilares. También como resultado de esta

agregación, se incrementa la aireación del suelo. La erosión se reduce debido al mejoramiento de la estructura.

- Efectos Químicos

La función más importante de las sustancias húmicas en el suelo, es el aumento de la capacidad de intercambio catiónico (CIC). Si no ocurrieran reacciones de intercambio de bases o cationes en el suelo, la disponibilidad de nutrientes para las plantas se vería fuertemente reducida.

Los ácidos húmicos y fúlvicos ayudan de dos formas a una mayor disponibilidad de nitrógeno por parte de las plantas:

- a) Estimulan a los microorganismos del suelo, que contribuyen a la mineralización del humus, liberando nitrógeno en forma de amonio y nitratos asimilables por las plantas.
- b) Al formar parte del complejo arcillo-húmico, son capaces de retener los cationes amonio, evitando pérdidas por lixiviación

- Efectos Biológicos

La actividad microbiana del suelo se ve estimulada y favorecida por los aportes de las sustancias húmicas, que les sirven de nutrientes y se multiplican más activamente cuando mejor provisto esté el suelo de humus. Además las sustancias húmicas estimulan la permeabilidad de la membrana celular, la formación de raíces y la germinación de semillas (17).

4.1 EXTRACCIÓN DE LAS SUSTANCIAS HÚMICAS

Las sustancias húmicas, están constituidas por grupos que no están definidos por una composición determinada (como sería lo ideal) sino que se establecen con base a su comportamiento frente a determinados reactivos. La mayor parte de las sustancias húmicas se encuentran unidas de diferente forma con la parte mineral del suelo, quedando tan solo una pequeña fracción en estado libre, por tanto, para pasar a estado soluble es preciso destruir esta unión (18).

La extracción de las sustancias húmicas del suelo se lleva a cabo en la actualidad con el empleo de diversas soluciones. Las sales neutras de los ácidos minerales, en particular el pirofosfato de sodio, al igual que algunas sales neutras de los ácidos orgánicos se utilizan con este fin, con base en la capacidad que tienen para formar precipitados insolubles o complejos solubles con el calcio, hierro, aluminio y otros cationes polivalentes, presentes en el suelo formando a su vez enlaces con las sustancias húmicas. Así, como resultado de dichas reacciones, éstas pasan a estado soluble. Sin embargo, con las soluciones citadas se extrae menos materia orgánica que con soluciones de álcalis (19).

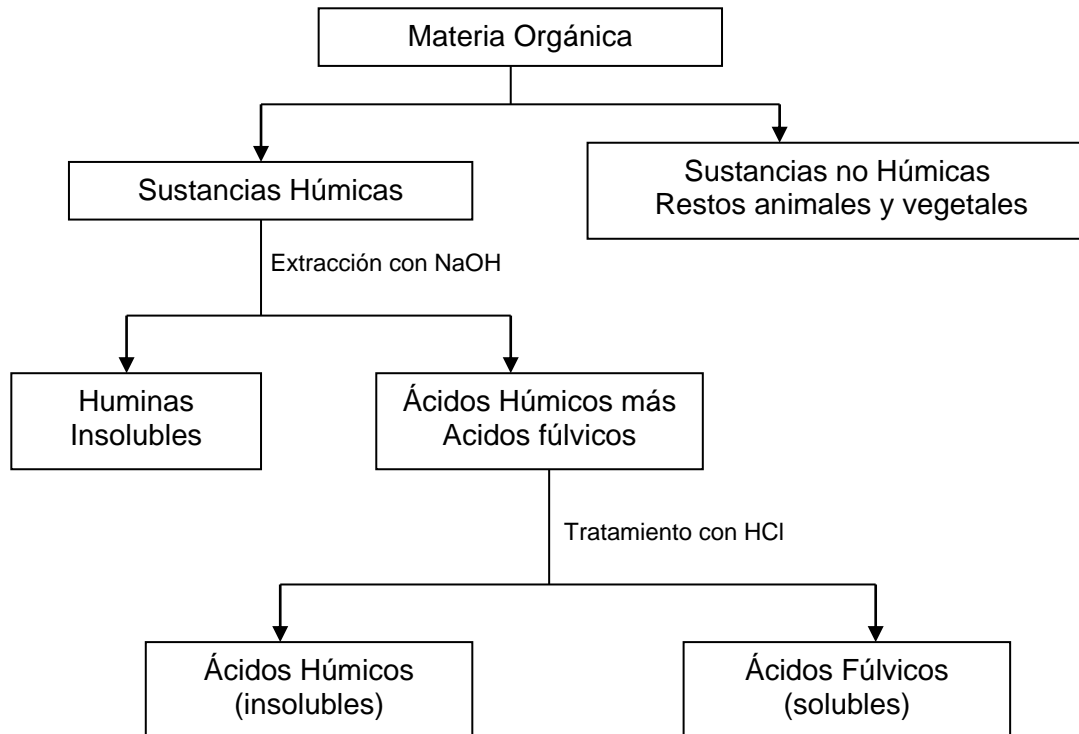
De hecho, la escogencia del extractante tiene la influencia decisiva en los resultados del fraccionamiento, en caso de usarlos en forma selectiva, la secuencia debe estar relacionada con el tipo de unión que se pretende romper. Si uno de los objetivos de la investigación es conocer los tipos de uniones existentes entre la materia orgánica y la fracción mineral, se debe usar en forma secuencial los siguientes extractantes.

1. Solución de Tetraborato de Sodio (Buffer de Sorensen). Este reactivo distingue enlaces electrostáticos, que son de fácil rompimiento por simple intercambio iónico, de las sustancias órgano-minerales móviles.

2. Solución de Pirofosfato de Sodio. Rompe enlaces de coordinación, específicamente, uniones entre la materia orgánica y las arcillas, por hidróxidos y óxidos metálicos, son los denominados complejos inmóviles.
3. Soluciones de Hidróxido de Sodio. Destruyen casi todos los enlaces órgano-minerales (20).

La solubilidad que en cierta manera está relacionada con el peso molecular y también con el número de grupos ácidos, varía ampliamente. Se ha postulado que en el seno de la macromolécula húmica existe una parte hidrófila, asociada a grupos ionizables, así como otra parte hidrófoba, de carácter aromático. Dependiendo del dominio de cada una de dichas partes, a veces incluso parcialmente separables por hidrólisis, se originan los diferentes grados de solubilidad; por medio de los cuales se suelen separar diferentes fracciones. De esta manera se obtienen los Ácidos Fúlvicos sometiendo el suelo a extracciones con álcali y posteriormente acidulando hasta un pH próximo a uno. El líquido amarillo rojizo contiene los Ácidos Fúlvicos y el precipitado castaño oscuro o negro, insoluble en dicho medio, constituye la fracción húmica. Todo lo que queda sin extraer se denomina convencionalmente humina (20). En el diagrama 2 se presenta el procedimiento.

Diagrama 2. Separación de las diferentes fracciones en la materia orgánica



4.1.1 Los Ácidos Húmicos

Los ácidos húmicos son el producto de un proceso oxidativo continuado en presencia de calcio, potasio, fósforo y micronutrientes. El material que resulta está enriquecido por estos elementos más nitrógeno fijado del aire, ocurriendo el humus "*mull*" en cantidad mucho mayor que en el material vegetal original.

Los Ácidos Húmicos no son solubles y tienen una estructura grande y compleja (8Å) no entran en las estructuras de las arcillas pero se ligan a ellas por sus electrovalencias negativas cuando las arcillas están cubiertas por capas de cationes positivos de dos o tres electrovalencias, como por ejemplo, el aluminio, hierro, calcio y magnesio (figura 4). Estos ácidos sirven pues de "puentes de unión" entre las partículas de la arcilla (21).

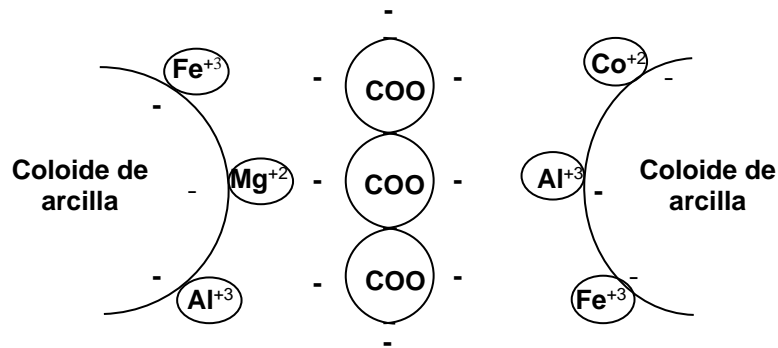


Figura 4. Esquema de agregación de arcilla por materia orgánica.

Sin embargo, esta ligazón sólo se produce cuando la arcilla está saturada con cationes positivos, como se mencionó más arriba. Si no está saturada, sus electrovalencias negativas repelen a las negativas de los ácidos húmicos y el efecto, en vez de una agregación es una dispersión del suelo. Los ácidos húmicos por sí mismos no tienen un efecto agregante. Este efecto depende de la película que recubre la arcilla.

Los ácidos húmicos no solamente ligan las arcillas, también son particularmente absorbidos por éstas de modo que forman un complejo húmico-arcilloso de buena estabilidad difícilmente destructible (22).

Sus principales características son: (21)

- Composición elemental aproximada: C (55.6%), H (4.5%), O (35.8%), N (4.2%).
- Pesos moleculares entre 50.000 y 100.000.
- En estos ácidos los núcleos aromáticos abundan y constituyen el esqueleto de donde salen cadenas alifáticas. Su polimerización es alta y en su estructura se

resentan moléculas esféricas (NH_2 y COOH , en diferentes formas), con proteínas y núcleos quinónicos con N fijado bajo formas $\text{NH}_4 - \text{NH}_2$, a veces heterociclos.

- La estructura tipo consiste de micelios de naturaleza polimérica, con una estructura básica de anillos aromáticos de di o tri hidroxifenol, con puentes de $-\text{O}-$, $-\text{CH}_2-$, $-\text{NH}-$, $-\text{N}=\text{}$, $-\text{S}-$ y con OH libres y dobles enlaces de quinonas.

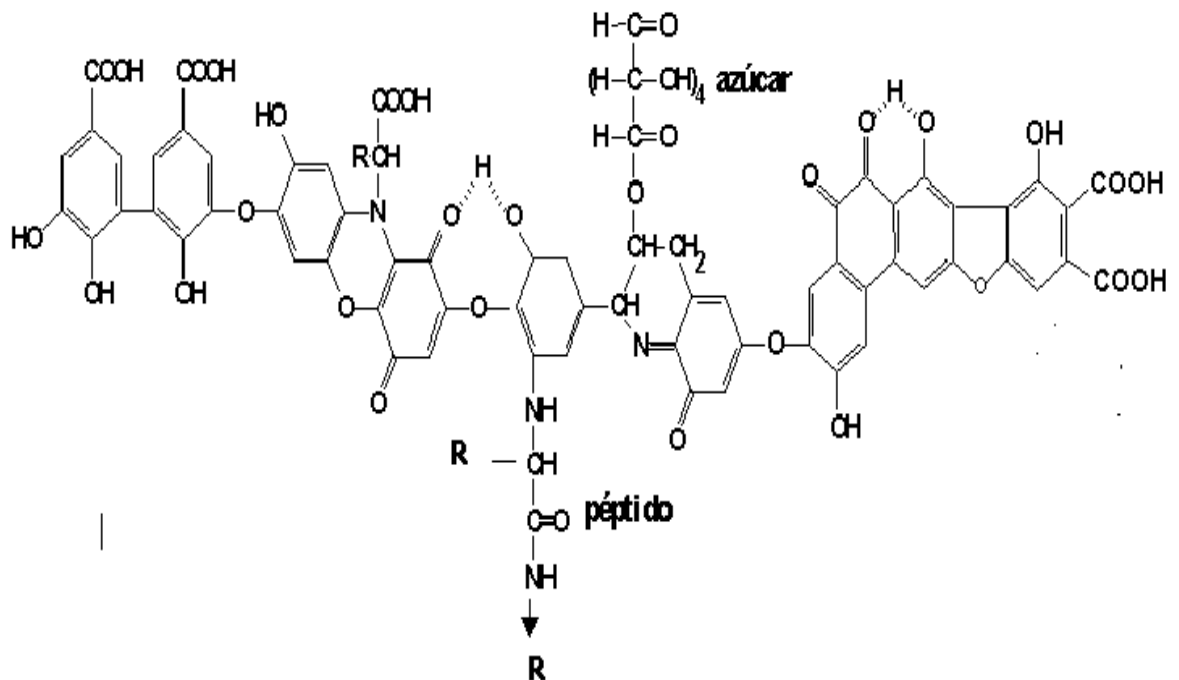


Figura 5. Estructura hipotética de los ácidos húmicos mostrando grupos fenólicos OH, quinonas, N y O como unidades “puente” y grupos COOH en anillos aromáticos (24)

4.1.2 Los Ácidos Fúlvicos

Los ácidos fúlvicos, poseen en esencia unidades estructurales similares a las de los ácidos húmicos, se caracterizan por la presencia de una fracción nuclear poco pronunciada (rejillas aromáticas de carbono) (figura 6) (23).

Los ácidos fúlvicos con relación a los ácidos húmicos poseen una relación C/H, más baja lo que indica su menor carácter aromático y en consecuencia, su naturaleza alifática predominante. Se trata de polímeros poco condensados y de peso molecular más bajo. Existen variadas proporciones en el humus y su concentración relativa depende de muchos factores, tales como la edad del humus, su origen y el grado de lixiviación del suelo, entre otros. Hoy es opinión generalizada que los ácidos fúlvicos, son los representantes menos maduros que los ácidos húmicos (24).

Los ácidos fúlvicos se extraen conjuntamente con los ácidos húmicos mediante una solución de pirofosfato de sodio o de soda diluida a pH 10. El medio ácido (HCl o H₂SO₄, pH 1) no precipita los ácidos fúlvicos pero si los ácidos húmicos.

Las principales características de los ácidos fúlvicos son (21):

- Color predominante amarillo - amarillo pardusco
- Composición elemental aproximada: C (44%), H (4.5%), N (3.3%), O (48%).
- Pesos moleculares variables entre 500 y 2000
- La acidez total (en especial OH y COOH).
- Predominio de compuestos alifáticos sobre núcleos aromáticos (fig. 6) (24).

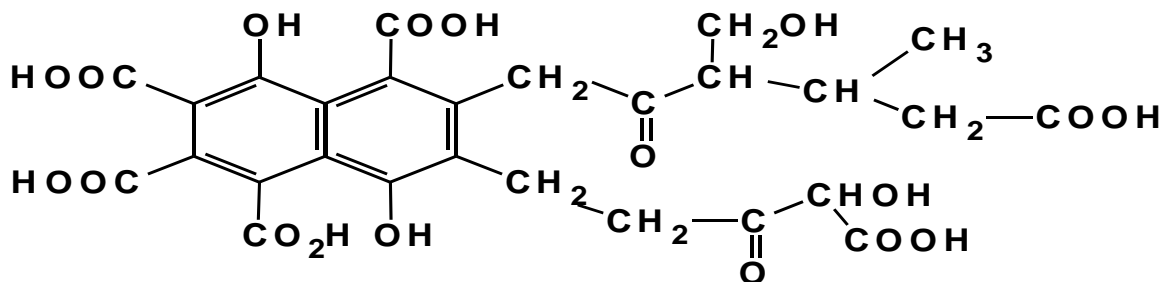


Figura 6. Estructura hipotética de los Acidos Fúlvicos

4.1.3 Huminas.

La fracción no extraíble por los reactivos alcalinos, denominada convencionalmente “humina”, puede llegar a constituir cerca del 60% del carbono orgánico total. Esta fracción es muy heterogénea en lo que se refiere a su origen y estructura.

Actualmente se sabe que existen diferentes formas de humina, cuya abundancia relativa está sujeta a diferentes factores que actúan sobre su evolución y que además confieren un carácter diferencial a los distintos tipos de suelos y representan gran interés en las más recientes clasificaciones del humus (25).

4.2 PURIFICACIÓN DE LAS SUSTANCIAS HÚMICAS

4.2.1 Purificación de los Ácidos Húmicos

La experiencia ha demostrado que el contenido de cenizas en los ácidos húmicos puede exceder del 30%. Existen diversos métodos para eliminarlas o por lo menos para reducir su contenido, utilizando repetidas precipitaciones con ácidos minerales; usando resinas de intercambio, tratándolos con soluciones diluidas de ácido fluorhídrico o mezclado con ácido clorhídrico.

El uso del ácido fluorhídrico en la remoción de cenizas, se basa en su eficiencia para disolver minerales arcillosos hidratados y formar nuevos complejos con los cationes di y trivalentes. Sin embargo, este tratamiento puede introducir modificaciones en los ácidos húmicos.

La diálisis es un método ampliamente usado en la purificación de ácidos húmicos y se lleva a cabo en diferentes medios: contra agua destilada, contra los ácidos

clorhídrico y fluorhídrico, ácido clorhídrico solo o en presencia de resinas de intercambio iónico de forma H^+ .

Con los ácidos húmicos coprecipitan sustancias no húmicas (por ejemplo, proteínas y carbohidratos), de difícil remoción debido a que en algunos casos están unidas covalentemente a una parte integral de la molécula (26).

4.2.2 Purificación de los Ácidos Fúlvicos

Estos ácidos presentan grandes dificultades para separar tanto impurezas orgánicas como minerales.

Los métodos empleados para la purificación de los ácidos húmicos, como la diálisis son poco eficaces para los ácidos fúlvicos, porque al mismo tiempo que atraviesan las membranas las sustancias impurificantes, lo hacen muchos compuestos de bajo peso molecular (27).

Entre varias de las alternativas para purificar los ácidos fúlvicos está el uso de resinas, especialmente de intercambio iónico, las cuales suelen ser eficaces por ser solubles en medio ácido. El uso de resinas de intercambio se basa en fenómenos de intercambio que han sido observados desde hace mucho tiempo. Un intercambiador iónico consiste en una matriz insoluble, a la cual se le han ligado covalentemente grupos cargados.

Los grupos cargados están asociados a contraiones móviles, que pueden ser intercambiados reversiblemente con iones de igual carga, sin alterar la matriz. La unión del contraión al intercambiador se debe a la presencia de fuerzas electrostáticas entre ellos; al iniciarse el proceso, las cargas del intercambiador

están balanceadas por contraiones con otro ión de igual carga, de tal forma que el proceso total en una zona dada es eléctricamente neutro (28).

Además de las resinas de intercambio, estudios recientes muestran el uso de resinas de adsorción como son la amberlita XAD-2,7,8 Y 16 (polimetilmetacrilato), y las columnas de polivinilpirolidina (PVP) insoluble. Las resina de Adsorción Amberlita son constituidas por un adsorbente polimérico suministrado en forma de esferas blancas insolubles. Es un material no iónico, hidrofóbico, constituido por un polímero de enlaces cruzados de los cuales se derivan sus propiedades adsortivas (contiene tanto una fase de polímero continuo y una fase porosa continua), poseen una alta área de superficie y su naturaleza es aromática. El adsorbente polimérico XAD-16 es producido para adsorber moléculas hidrofóbicas de solventes polares y componentes orgánicos polares de flujos de vapor. Su característica distribución de tamaño de poros hace de la Amberlita una excelente opción para la adsorción de sustancias orgánicas de relativamente bajos a medianos pesos moleculares (28).

Con estas resinas se adsorben los extractos fúlvicos, y se considera que los materiales coloreados que se retienen a pH ácidos son principalmente de naturaleza aromática. Estas fracciones son eluidas con NaOH 0.1 N y pasadas a través de una columna de intercambio como la amberlita IR-120. Esta metodología es además la sugerida por la Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo (28).

4.3 EVALUACIÓN DEL ÍNDICE DE HUMIFICACIÓN

4.3.1 Índices basados en el fraccionamiento de la materia orgánica

Los índices llamados relaciones de humificación: $HR1 = AH/FF$; $HR2 = AH/AF$ (AH, FF y AF son las cantidades de carbono en las fracciones húmicas, fúlvicas y en los ácidos fúlvicos, respectivamente). En los procesos de compostaje estos índices aumentan, reflejando la formación de especies estructuralmente más complejas (29).

4.4 ACIDEZ Y MATERIA ORGÁNICA

Está demostrado que el efecto tóxico del aluminio es uno de los principales factores que intervienen en el pobre crecimiento de las plantas en los suelos ácidos.

La acidez del suelo depende del contenido de hidrógeno ionizable, del aluminio disociable en numerosas formas y, en menor grado, de los iones de Fe y Mn, todos en equilibrio con la solución del suelo donde ocurren variadas reacciones de hidrólisis. La acidez también depende del hidrógeno y el aluminio intercambiables o no intercambiables y del hidrógeno de la materia orgánica (30).

La reacción del suelo es una de las propiedades químicas más importantes del mismo; así, entre otros, la solubilidad y disponibilidad de muchos de los nutrimentos requeridos por las plantas para su óptimo crecimiento están íntimamente relacionados con el pH. Se conoce que la solubilidad del aluminio y la severidad de sus efectos sobre las plantas están asociados con factores como el pH, el tipo de arcillas presentes en el suelo, la concentración de cationes y los contenidos de materia orgánica.

El encalado ha sido el procedimiento más utilizado para aliviar la toxicidad por el aluminio pues incrementa el pH del suelo, disminuye la solubilidad del aluminio, suministra calcio y aumenta la disponibilidad de algunos nutrientes (31). Sin embargo, esta técnica no siempre es posible utilizarla eficientemente debido a varios factores tales como costo de transporte a sitios lejanos, topografía del terreno y finalmente la incorporación de la cal al suelo, la cual se acostumbra hacer con rastra; de esta manera, no se logra enterrarla a más de 10 ó 15 cm, siendo necesario mezclarla con los primeros 30 cm del suelo aproximadamente, es decir, con el volumen de suelo que es explorado por las raíces con mayor intensidad (32).

Otra alternativa para aliviar los efectos nocivos del Al según se reporta en la literatura, es la aplicación de materia orgánica; con este fin se han ensayado diversos materiales como ácidos húmicos, productos derivados del carbón, turba, gallinaza, vermicompost, lombricompost, abonos verdes, residuos de cosechas y otros obteniéndose, generalmente en suelos ácidos, una rápida disminución del Al soluble o intercambiable, y un incremento en el rendimiento del cultivo (31).

Entre algunas de las fuentes de materiales a las que puede recurrir el agricultor para suministrar y conservar la materia orgánica del suelo están (33):

4.4.1 Estiércoles bien descompuestos

Debido a que la materia orgánica es muy beneficiosa desde el punto de vista químico, físico y biológico es necesario conservarla mediante adiciones periódicas de residuos de cosechas, abonos verdes incorporados, compost artificialmente preparado, en condiciones controladas a partir de restos de tejidos vegetales y/o animales y adición de excretas de animales bien descompuestas. Estos materiales son ricos en elementos nutritivos tanto para los organismos del suelo,

como para las plantas y, además, al descomponerse el material orgánico queda un residuo estable –humus- de buena calidad.

4.4.2 Compost o abono orgánico artificial

El compost es un abono orgánico de excelente calidad que se prepara a partir de hierbas, pulpa de café, tallos de trigo, basuras, estiércoles y de todo material orgánico susceptible a ser biodegradado en condiciones controladas.

El compostaje es un proceso biooxidativo en el que intervienen numerosos y variados microorganismos que requieren una humedad adecuada y sustratos orgánicos heterogéneos en estado sólido, implica el paso por una etapa termofílica y una producción natural de fitotoxinas, dando al final como productos de los procesos de degradación, dióxido de carbono, agua y minerales.

En el diagrama 3 se representa el resumen del proceso de compostaje

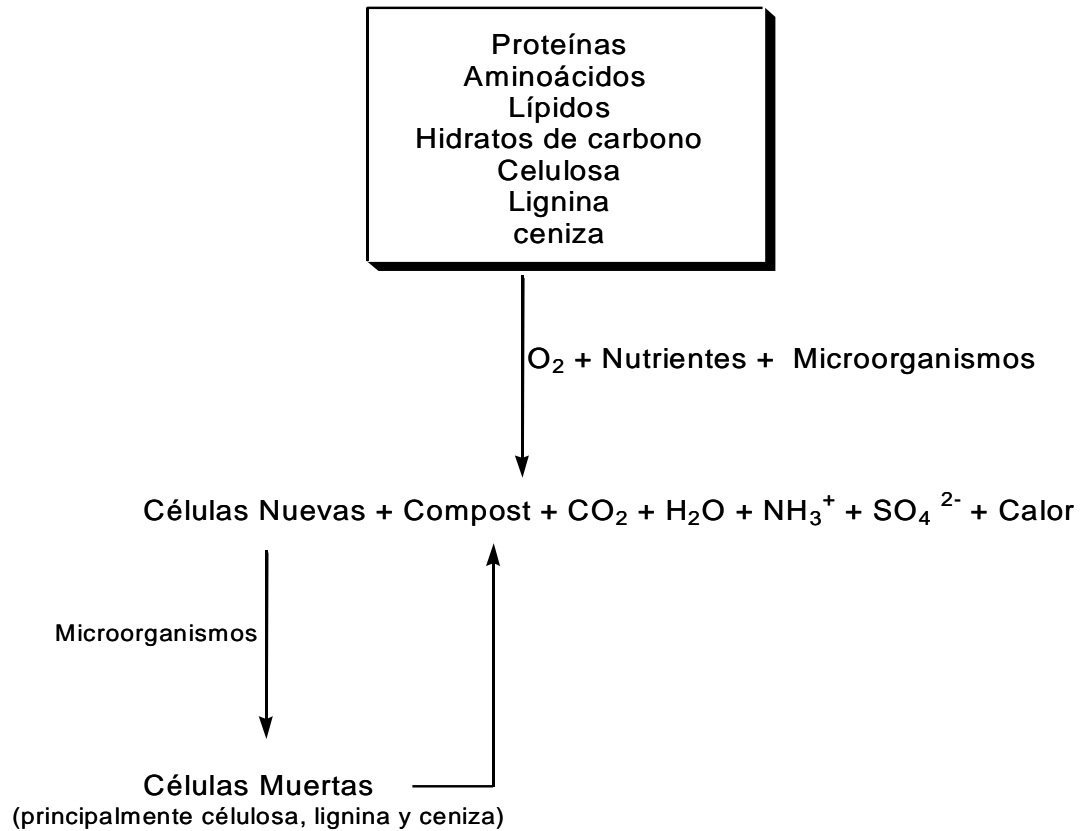


Diagrama 3. Proceso de compostaje aerobio (34)

4.4.2.1 Factores que deben ser controlados

4.4.2.1.1 Temperatura

Como resultado de la gestión de diferentes grupos de microorganismos, en adecuadas condiciones de humedad y aireación, la temperatura de la masa de compostables se eleva. En pocos días (2-6) debe llegar a más de 45 °C y mantenerse allí por efecto de la lignocelulolisis y reducción o supresión de patógenos al hombre y a las plantas del cultivo. Es la etapa termofílica la que

define si un proceso corresponde o no, al compostaje. Pasada la etapa termofílica, la temperatura desciende gradualmente hasta casi nivelarse con la del ambiente.

4.4.2.1.2 Humedad

La gestión biológica de los microorganismos requiere de agua para la formación de su bioma. Se necesita una humedad alta a comienzo del proceso cuando la actividad es más intensa y un poco menos a medida que se avanza en la descomposición. En los procesos donde se hacen volteos, para reactivar el proceso, se acostumbra rehumedecer y entonces la temperatura se eleva de nuevo.

4.4.2.1.3 Aireación

Para que el proceso se desarrolle en condiciones aeróbicas, los microorganismos deben disponer del oxígeno suficiente, lo cual se logra mediante la aireación.

4.4.2.2 Clasificación de sistemas de compostaje

Por los años 30's, se desarrolló, el sistema INDORE (llamado así porque el primer lugar donde se implementó fue en la India) de compostaje, que consistía en apilar residuos animales y luego todo tipo de residuos en capas de 1.5 m de altura y realizar volteos con fines de aireación. Después de ello, se han presentado muchos desarrollos tecnológicos y a la fecha se tiene la siguiente clasificación:

4.4.2.2.1 Sistema abierto

Apilamiento estático

- Con aire por succión (S. Beltsville).
- Con aire soplado en conjunción con el control de la temperatura (S. Rutgers).
- Ventilación alternante (succión y soplado) y control de la temperatura.

Apilamiento con volteo

Apilamiento con volteo y

aireación forzada (S. Siloda).

4.4.2.2.2 Sistema cerrado

Reactores verticales

- Continuos
- Discontinuos

Reactores horizontales

- Estáticos
- Con rotación

En países como Colombia, ha tenido algún uso el sistema de apilamiento con volteo, que aun cuando es riguroso en una adecuada aireación, resulta muy barato para instalar y operar (35).

Otra de las fuentes de materia orgánica a la que pueden recurrir los agricultores es el lombricompost, el cual se obtiene de las deyecciones de la lombriz *Eisenia foetida*. Esta lombriz tiene la capacidad de humificar en un período de horas, el material orgánico ingerido, tiempo que demora su proceso digestivo.

Este proceso se inicia con la fragmentación y mineralización enzimática del material consumido, con lo cual se obtienen fragmentos de moléculas orgánicas complejas, nitrógeno y minerales. Esta primera etapa comienza en la actividad bucal y termina en la molleja.

A continuación el material degradado pasa por la fracción intestinal donde es colonizado por una alta carga microbiana simbiótica la cual forma a partir de estos materiales, complejos amorfos coloidales que son expulsados como deyecciones que reciben el nombre de Humus de Lombriz o Lombricompost.

De acuerdo a lo anterior, *E. foetida* puede ser considerada como una cámara humificadora de ambiente controlado, ya que permite a los microorganismos que viven en su interior trabajar en condiciones óptimas, aislados del efecto exógeno aumentando su productividad, la cual es medida en términos de humificación del material deyectado (36).

5. METODOLOGÍA

5.1 Ubicación geográfica

El trabajo se desarrolló en los laboratorios de Agroquímica y de Química de la Universidad del Cauca y en el laboratorio de suelos de la Corporación Regional del Cauca (CRC).

5.2 Preparación del compost y el lombricompost

5.2.1 Preparación del Compost

Con base en trabajos realizados anteriormente por el Grupo de Investigación en Agroquímica (37) se seleccionó la composición porcentual de los materiales, suelo, cascarilla de café, cal agrícola, miel de purga, levadura, bobinaza, polvillo de caña y vinaza. Se hizo una mezcla homogénea de los materiales dispuestos en un sistema abierto de apilamiento estático con volteo. El material se aireó permanentemente durante todo el proceso. La temperatura y la humedad se controlaron diariamente hasta la etapa de enfriamiento.

5.2.2 Preparación del Lombricompost

Se elaboraron dos camas y se instalaron al aire libre, en el piso y en un lugar sombreado. Las dimensiones de las camas fueron de 1 m por 1.5m. su altura fue de aproximadamente 28 cm. Se extendió 1 capa de bobinaza de 10 cm de alto inicialmente.

Se depositó aproximadamente 1 Kg de lombriz roja californiana (LRC) por cada metro cuadrado de bobinaza. Se controló diariamente la humedad.

Cada ocho días se alimentó a la LRC con una capa de 2 cm de bobinaza hasta un periodo de tres meses.

5.3 Análisis Físicos para el compost y el lombricompost

5.3.1 Determinación de Humedad

Se pesó 10 g de cada bioabono en una cápsula tarada previamente y se introdujo en estufa por 24 horas a 105 °C. Con la diferencia de pesos se determinó la humedad.

5.3.2 Evaluación de la Temperatura

La temperatura se evaluó diariamente tres veces al día, durante tres meses con termómetro.

5.4 Evaluación del grado de humificación

Para evaluar el grado de humificación del compost y el lombricompost se realizaron las siguientes determinaciones.

5.4.1 Análisis Químicos

5.4.1.1 Determinación del pH

El pH se determinó por medio del método potenciométrico. Esta determinación se realiza en una suspensión compost:agua (1:1). Para realizarlo se tomaron 20 g de cada bioabono y se les adicionó 20 mL de agua destilada a cada uno. Se agitó intermitentemente durante 1 hora y luego se midió el pH.

5.4.1.2 Determinación de la Relación C/N

Consiste en la relación del carbono determinado por el método de Walckley-Black y el nitrógeno determinado por el método de Kjeldahl. Los cuales se determinaron como se describe a continuación.

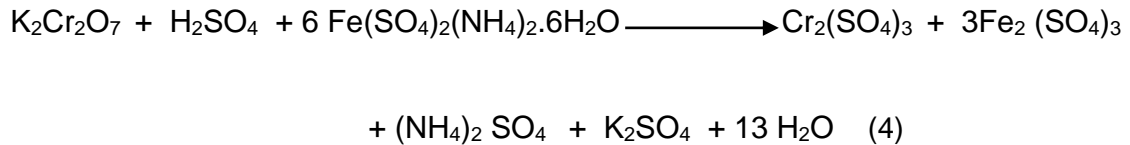
5.4.1.2.1 Determinación de la Materia Orgánica

Para determinar el contenido de materia orgánica en el compost y lombricompost se utilizó el método Walckley-Black (28). El cual consiste en oxidar el carbono orgánico presente en el suelo con un oxidante en medio ácido; el oxidante empleado es $K_2Cr_2O_7$ 1N y el ácido es H_2SO_4 concentrado. Por medio de este método se extrae el carbono fácilmente oxidable.

En este método la oxidación del carbono orgánico no es total, se logra un rendimiento del 77% y por eso se llama carbono orgánico más fácilmente oxidable. El resto es grafito o carbón vegetal que no es fácilmente oxidable.

Como queda materia orgánica que no se oxida y $K_2Cr_2O_7$ que sobra después de la reacción entonces se valora volumétricamente lo que no reacciona de $K_2Cr_2O_7$ con una solución de sulfato ferroso amónico, utilizando un blanco que consta de

solución de $K_2Cr_2O_7$ con H_2SO_4 . En la titulación se utiliza difenilamina como indicador. La reacción que sucede sería la siguiente.



5.4.1.2.2 Determinación de Nitrógeno por el Método de Kjeldahl.

Este método es el utilizado universalmente para la determinación cuantitativa de nitrógeno procedente de diversos materiales como el compost y el lombricompost, este método está basado en tres etapas:

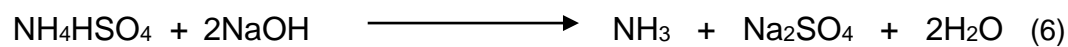
Primero: Oxidación de la muestra

Las muestras de compost y lombricompost se tratan separadamente con ácido sulfúrico concentrado y catalizadores para oxidar la materia orgánica y convertir el nitrógeno en sulfato ácido de amonio según la siguiente reacción:



Segundo: Descomposición del sulfato ácido de amonio

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

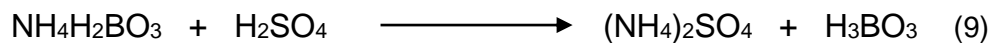


Tercero: Titulación del borato de amonio

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

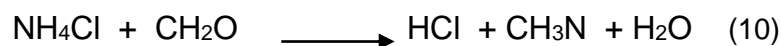


ó



5.4.1.3 Determinación de la capacidad de intercambio catiónico

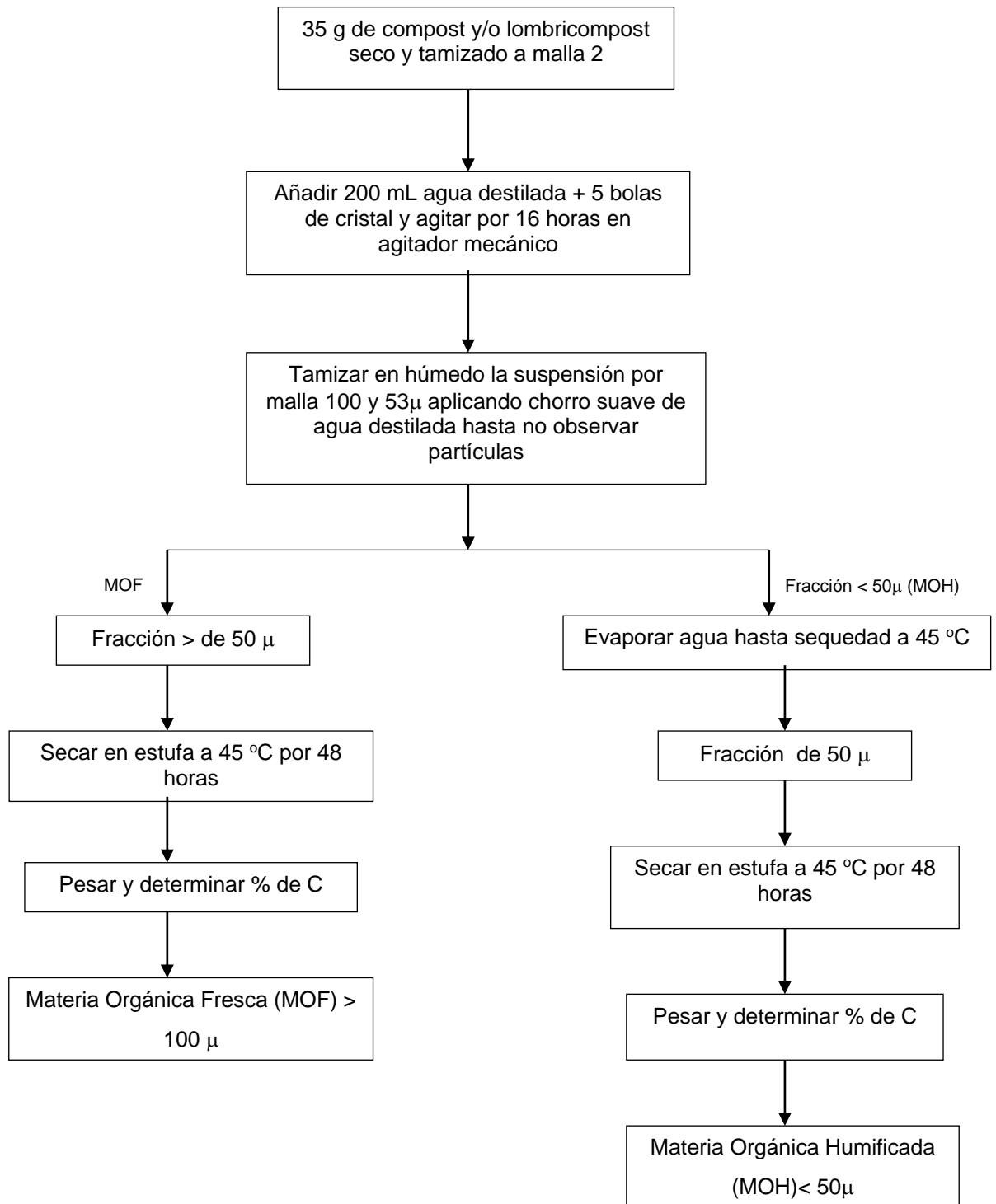
Consiste en sacar todos los cationes que tiene el compost y el lombricompost y reemplazarlos por NH_4^+ . El compost y el lombricompost seco, tamizado y muy fino se satura con acetato de amonio 1N pH 7, tratando de llevar la saturación al máximo, pero que sea estable. El ion amonio se desplaza con Na^+ (NaCl al 10%), por lo que el NH_4^+ queda en forma de NH_4Cl , se agrega formol neutralizado al 40% y el HCl generado se titula con NaOH 0.1N en presencia de fenolftaleína, de acuerdo con la siguiente reacción:



5.4.2 Separación de la materia orgánica fresca (MOF) y materia orgánica humificada (MOH)

Con el objeto de separar las sustancias Húmicas de la materia orgánica no humificada se utilizó el método granulométrico, que consiste en utilizar la diferencia de tamaño molecular de la materia orgánica humificada y la materia orgánica fresca (no humificada). La fracción menor de 50 μ corresponde a la materia orgánica humificada y la fracción mayor de 100 μ corresponde a la materia orgánica fresca. Para separar estas dos fracciones se utilizó un tamizador automático (Retsch). En el diagrama 4 se muestra el procedimiento realizado.

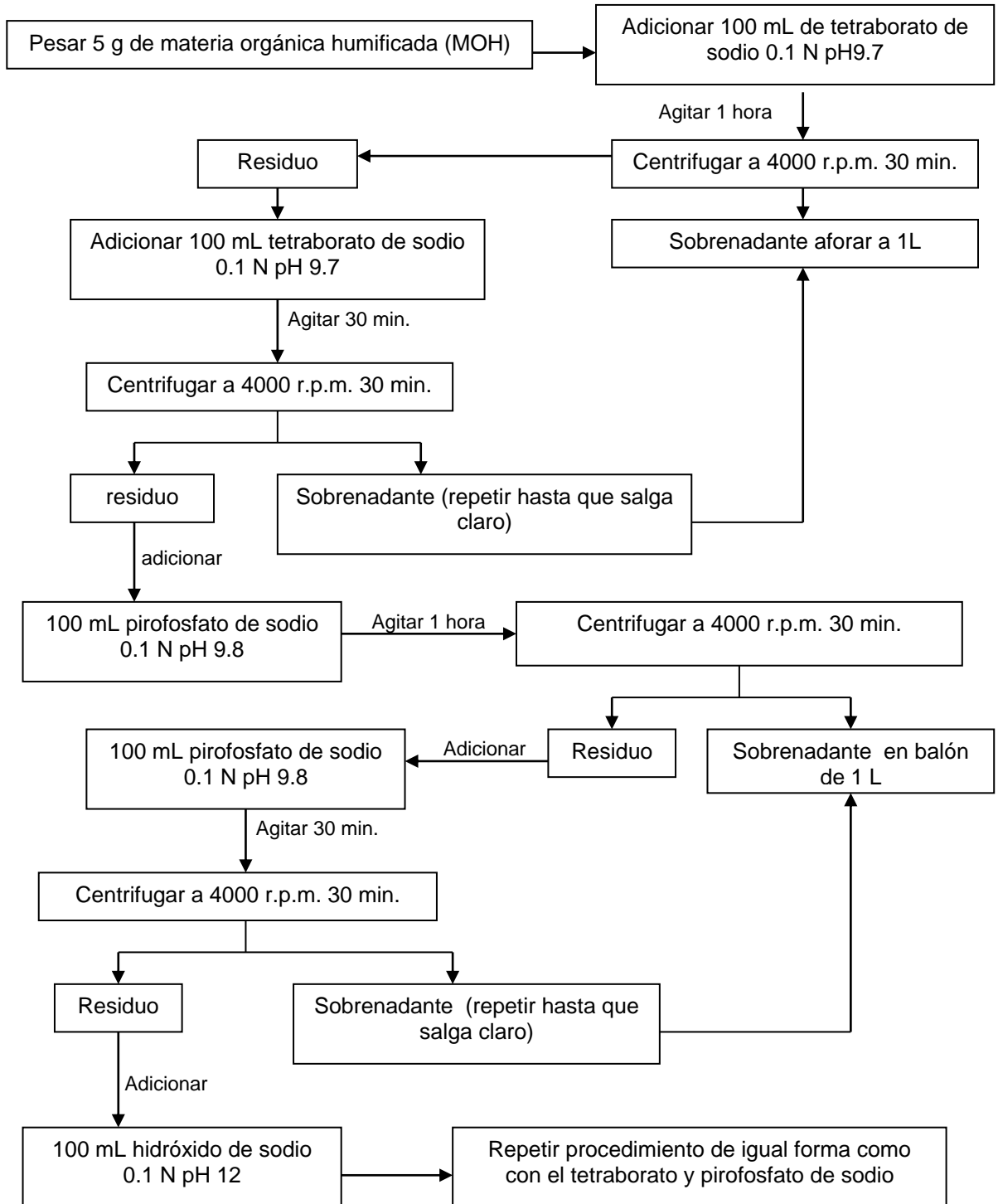
Diagrama 4. Separación Granulométrica



5.4.3 Extracción de las Sustancias Húmicas

Para la extracción de las sustancias húmicas se partió de la materia orgánica humificada y se siguió el método sugerido por Barragán y realizado por Dávila (28), realizando una extracción sucesiva utilizando primero tetraborato de sodio 0.1N, con el fin de romper enlaces electrostáticos por simple intercambio iónico, es decir afectando las sustancias organominerales móviles; en segundo lugar se utilizará pirofosfato de sodio 0.1N, el cual actúa sobre los enlaces de coordinación de la materia orgánica y las arcillas, afectando así los compuestos inmóviles; y por último hidróxido de sodio 0.1N con el cual se destruye el resto de los enlaces organominerales. Aquí se obtienen los respectivos sobrenadantes de cada extractante donde se encuentran los ácidos fúlvicos y los ácidos húmicos y una fracción insoluble que es la denominada Humina (diagrama 5).

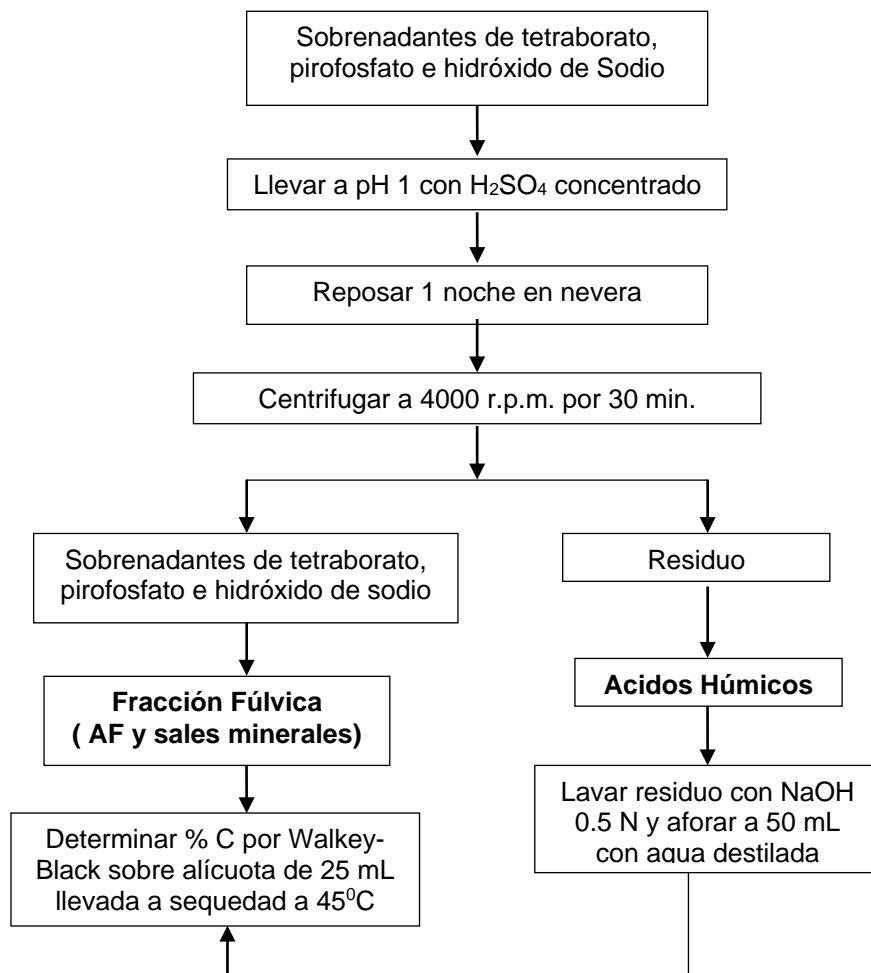
Diagrama 5. Extracción de las sustancias húmicas



5.4.4 Separación de las Sustancias Húmicas

Para separar los ácidos fúlvicos de los ácidos húmicos se partió de los sobrenadantes básicos. La separación de los ácidos fúlvicos de los ácidos húmicos se realizó llevando las soluciones de los sobrenadantes a pH 1 con ácido sulfúrico concentrado, donde los ácidos húmicos precipitan por ser insolubles en medio ácido. Posteriormente, se procedió a la separación por medio de centrifugación a 4000 r.p.m., obteniendo un sobrenadante que contiene: la fracción fúlvica con sales minerales y un residuo que son los ácidos húmicos; como se ilustra en el diagrama 6.

Diagrama 6. Separación de los Acidos Fúlvicos y los Acidos Húmicos



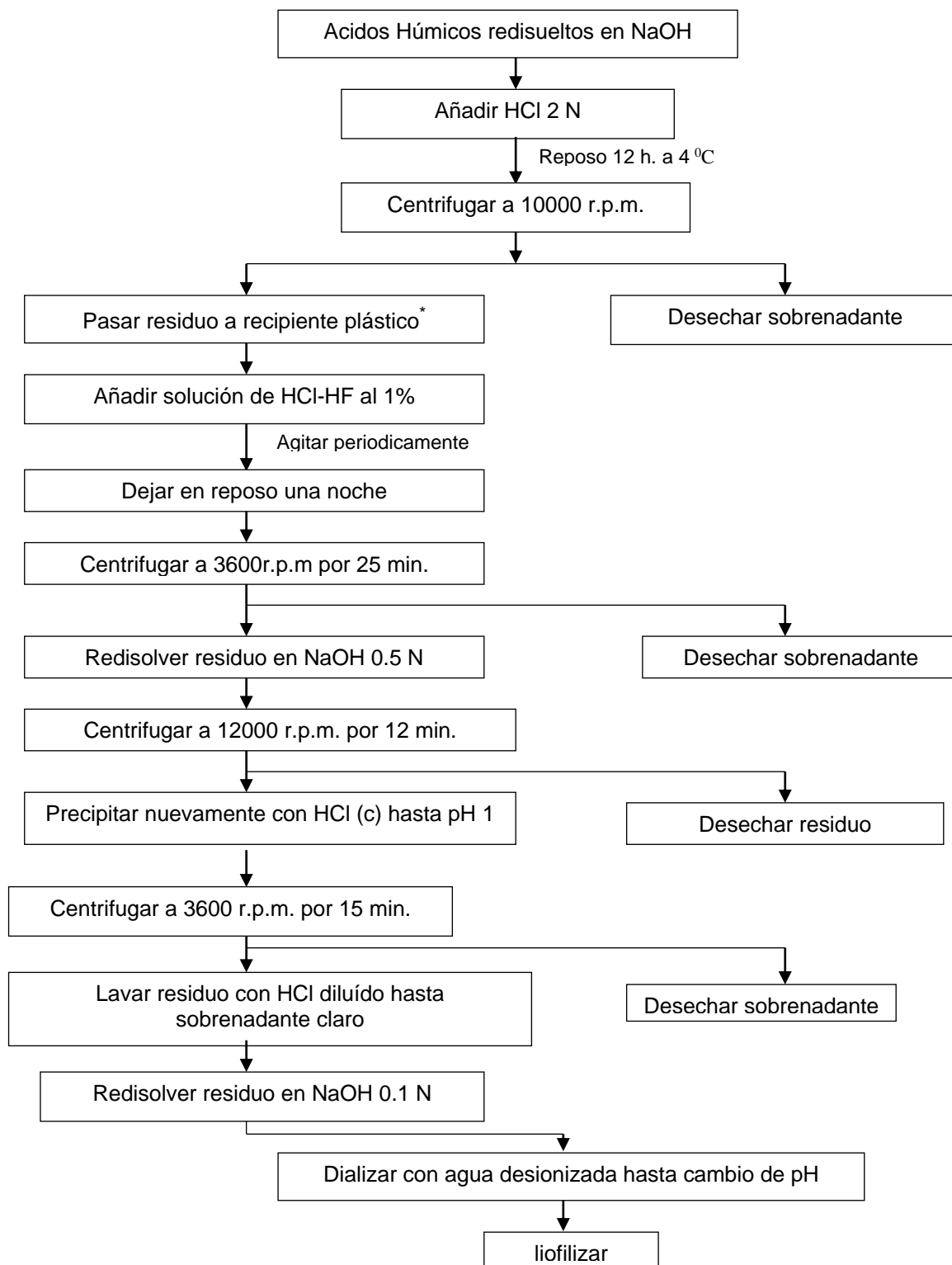
5.4.5 Purificación de los Ácidos Húmicos

Los ácidos húmicos obtenidos de acuerdo al diagrama 3 son sometidos en su totalidad al tratamiento de purificación.

La purificación de los ácidos húmicos se realizó por la combinación de metodologías: centrifugación a alta velocidad, tratamiento con ácido clorhídrico-fluorhídrico y diálisis por 24-48 horas, utilizando membranas de celulosa de 12000 daltons hasta obtener un cambio final de pH (ácido).

Con los ácidos húmicos ya purificados se procedió a liofilizar las muestras con el fin de obtenerlos en estado sólido para realizar los análisis respectivos. Este procedimiento se esquematiza en el diagrama 7.

Diagrama 7. Purificación de los ácidos húmicos



*Se deben emplear frascos plásticos, ya que se trabajará con HF y este ácido reacciona el vidrio produciendo su deterioro

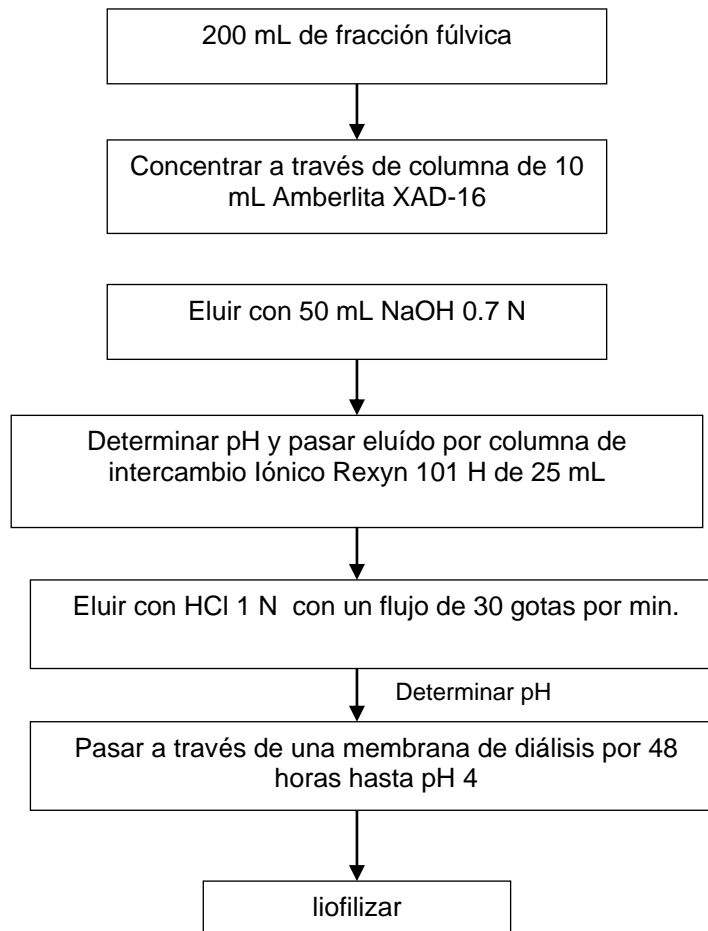
5.4.6 Purificación de los Ácidos Fúlvicos

Con el objeto de purificar los ácidos fúlvicos, se deben eliminar primero las sales presentes en la fracción fúlvica.

Para eliminar estas sales, se utilizó inicialmente una resina de adsorción Amberlita XAD-16, que adsorbe las moléculas de bajo a mediano peso molecular como los ácidos fúlvicos y elimina las sales provenientes de los extractantes. Para la recuperación de los ácidos fúlvicos, se eluyó con NaOH 0.7 N, obteniendo los ácidos fúlvicos en forma de sales de NaOH. Posteriormente se pasó esta solución de ácidos fúlvicos por una columna de 25 cm de longitud empaquetada con la resina de intercambio catiónico como la Rexyn 101 con grupos activos RSO_3^- , la cual se activó con HCl 1N. Al pasar las soluciones de ácidos fúlvicos por esta resina se eliminó la mayor parte de Na^+ intercambiándolo por iones H^+ .

Como la purificación no es completa, pues quedan sales, los ácidos fúlvicos obtenidos fueron sometidos a diálisis por 48 horas, utilizando membranas de celulosa con tamaño de poro de 3500 daltons. Con los ácidos fúlvicos purificados, se procedió a liofilizar las muestras. Este procedimiento se ilustra en el diagrama 8.

Diagrama 8. Purificación de los Acidos Fúlvicos



5.5 Evaluación de la cantidad de Al retenido por la MO del compost y el lombricompost

Para evaluar la capacidad de retención de aluminio por los materiales en sistemas acuosos, se utilizaron los siguientes tratamientos: 1.Suelo (del Departamento del Cauca), 2.Suelo sin Materia Orgánica, 3.Lombricompost, 4.Compost, 5.Suelo con 0Compost y 6.Suelo con Lombricompost, con soluciones de aluminio correspondientes a 3, 15, 30 meq/100g de material. Estas dosis corresponden a 5 y 10 veces el valor medio de aluminio que produce toxicidad al suelo (3 mequ/100

g). Estas soluciones fueron preparadas a partir de una solución patrón de AlCl_3 de 1000 ppm.

Para realizar la evaluación de la retención de aluminio se tomaron 180 mg de cada material (suelo, suelo sin materia orgánica, lombricompost, compost, suelo con compost y suelo compost lombricompost) y se mezclaron con 180 mL de cada una de las dosis de aluminio (3,15 y 30 meq de aluminio)

Para hacer la mezcla de suelo con compost y suelo con lombricompost, se tomaron cantidades de suelo y de los bioabonos respectivos en proporción tal que se llevó el porcentaje de materia orgánica del suelo hasta un 10% aproximadamente que es el valor promedio en este tipo de suelos. Se hicieron seis tratamientos con dos réplicas cada uno.

Las mezclas se agitaron por 16 horas, después se filtraron al vacío y en el filtrado se determinó el aluminio en equilibrio mediante espectrofotometría de absorción atómica en el equipo UNICAM 989 de la Corporación Regional del Cauca (CRC).

El aluminio retenido se determinó por diferencia entre el aluminio suministrado originalmente y el de equilibrio.

Se practicó a los resultados anteriores un tratamiento estadístico que comprendió un análisis de varianza (ANOVA), con el objeto de saber si hay diferencias entre los tratamientos en las diferentes dosis de aluminio. Además se practicó la prueba de Duncan para saber cuales tratamientos o entre cuales dosis hay diferencia significativa.

6. ANÁLISIS DE RESULTADOS

6.1 Preparación del compost

Preparación del Compost

La composición de los materiales utilizados en la preparación del compost se presenta en la tabla 1.

Tabla 1. Composición porcentual del Compost

MATERIAL	PORCENTAJE (%)
Tierra (común)	27
Cascarilla de Café	27
Tierra Negra	1
Cal agrícola	1
Miel de Purga	0.3
Levadura	0.03
Bobinaza	34
Polvillo de Caña	10
Vinaza	CSP ^Σ

^Σ cantidad necesaria para llegar a la humedad óptima

Después de mezclar los materiales se tomó una muestra, se secó en invernadero y se tamizó en tamíz de dos micras. La mezcla presentó la composición descrita en la tabla 2.

Tabla 2. Análisis químicos y físicos de la mezcla de los materiales compostables

Humedad	pH	%C	%MO	%N	C/N	CIC meq/100g	Acidez Al	Acidez Int.
15.77	6.42	28.01	48.3	0.92	30.4	46.84	-	-

La gestión biológica de los microorganismos requiere de un medio húmedo para la formación de su biomasa. Se necesita una humedad alta al comienzo del proceso cuando la actividad microbiana es más intensa. Se busca inicialmente una humedad entre 30 y 50%, la cual se alcanza con la humedad propia de los compostables o añadiendo agua. En este caso, la humedad se acondicionó al 50% con vinaza.

En cuanto al pH, para lograr una descomposición óptima éste debe permanecer en un rango de 6.5-7.5. de acuerdo a esto, el pH con el cual se inicia el proceso, se encuentra cercano a la neutralidad (6.42) y es adecuado para iniciar el compostaje

El porcentaje de materia orgánica, la relación C/N y la capacidad de intercambio catiónico (CIC) se encuentran en el rango requerido para iniciar el compostaje. Estos parámetros hacen posible que los microorganismos realicen el proceso de degradación biológica adecuado.

Otro parámetro que se evaluó durante el proceso de compostaje (tres meses) fue la temperatura. En la tabla 3 y figura 7 se presentan los valores de temperatura observados durante el periodo de compostaje.

Tabla 3. Variación de la temperatura en °C durante el tiempo de compostaje

Tiempo (días)	Temperatura (°C)	Tiempo (días)	Temperatura (°C)
1	24	21	44
2	35	22	38
3	45	23	40
4	52	24	38
5	50	25	38
6	52	26	35
7	52	27	34
8	51	28	34.5
9	51.5	29	32
10	50	30	31.5
11	49	31	32
12	50	32	30
13	48	33	30
14	49	34	29.5
15	48	35	28
16	46.5	36	28
17	48	37	28
18	46	38	28
19	45	39	28
20	44	40	28

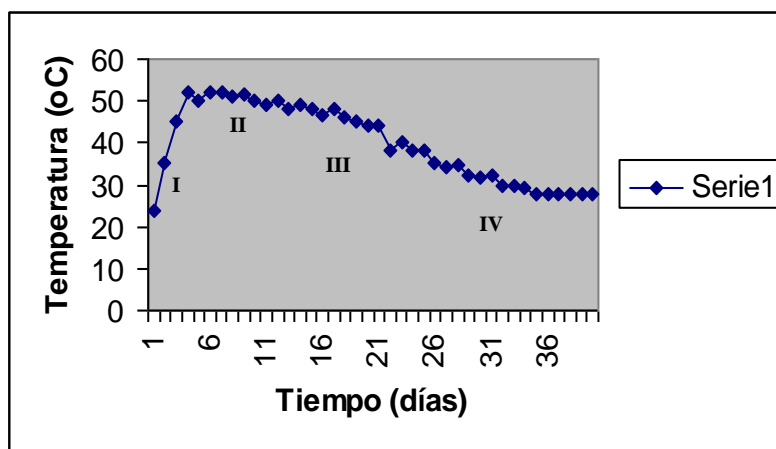


Figura 7. Figura de Temperatura durante la Preparación del Compost

En la tabla 3 y figura 7 se observa que hubo un incremento de la temperatura en función del tiempo, hasta llegar a un máximo y luego decrece hasta una temperatura cercana o igual a la ambiente, obteniéndose las cuatro etapas típicas del compostaje que son: mesofílica (I), termofílica (II), enfriamiento (III) y madurez (IV).

Cuando se inicia el proceso, las moléculas de azúcares, almidones y proteínas de rápido uso energético, sirven de sustrato inicial a los microorganismos mesófilos cuya actividad, productos de reacción y multiplicación van calentando los compostables. Hay liberación de CO₂ y H₂O, con esto se espera que se reduzca el contenido de carbono de los compostables y el porcentaje de la fracción mineral tiende a aumentar.

Al alcanzar la etapa termofílica (mayor de 45 °C), se inicia la degradación de moléculas de más difícil descomposición, hemicelulosa y lignina; así como ceras, grasas, aceites y resinas; como la actividad es máxima, se alcanzan las máximas temperaturas, siendo también máxima la liberación de CO₂ y H₂O, reduciendo así el contenido de carbono del compost en elaboración y se hace más elevado el porcentaje de minerales con respecto a la etapa anterior.

En esta etapa es muy importante el carácter bióxidativo del proceso: la materia se utiliza para síntesis de los microorganismos y no es totalmente oxidada. El nitrógeno amoniacal N-NH₄ de la cadena proteína-aminoácidos-aminas-amonio puede o no perderse hacia la atmósfera antes de pasar a la forma N-NO₃. Esto es función de la relación C/N de los compostables: se pierde nitrógeno si la relación es baja y se puede llegar a pérdidas nulas con relaciones altas.

En la etapa de enfriamiento (50-45 °C) que se empieza a generar por una reducción de la población microbial que ya no encuentra suficiente sustrato alimenticio, continúa la descomposición de los componentes más resistentes y

parte del sustrato lo constituye la necromasa microbial. Se acentúa la formación de nitratos que dominan sobre las formas amoniacales. Continúa la reducción de carbono de la masa en compostaje pero más atenuadamente. La formación de sustancias húmicas principalmente ácidos húmicos se ve favorecida por la aireación y el pH que ronda la neutralidad.

En lo que se puede llamar la etapa de maduración, los cambios son menores día a día pero con las tendencias de aumentar el porcentaje de fracción mineral y de los nitratos (38).

Como se observa en la figura 7, en el compost la etapa mesofílica (I) ocurre en los primeros tres días; al cuarto día la temperatura aumenta rápidamente a 52 °C y se mantiene ahí hasta el séptimo día, luego la temperatura comienza a disminuir gradualmente hasta llegar a la etapa de enfriamiento y madurez.

Como el compost presenta una relación C/N adecuada se puede apreciar que los microorganismos desarrollaron el proceso bioquímico de la degradación. Esto además se confirma con la elevación de la temperatura aunque ésta no superó los 52 °C, impidiendo que haya deficiencias de nitrógeno para la continuación del proceso, pero esto también se puede atribuir a la cantidad de compostables utilizados en el proceso que fue poco.

A pesar de que la temperatura no llegó hasta 70 °C (que sería lo ideal); debido posiblemente a la falta de oxígeno, ya que la pila era muy grande y se dificultó la aireación. Sin embargo, en la figura 7 se observa que durante el proceso de compostaje se presentaron de una forma definida las cuatro etapas típicas del compostaje.

6.2 Evaluación del Grado de Humificación del Compost y Lombricompost

Con el objeto de evaluar el grado de humificación se hacen los análisis físicos y químicos que comprenden determinación de humedad, pH, materia orgánica, relación C/N, capacidad de intercambio catiónico, entre otros; así como separación de materia orgánica fresca y materia orgánica humificada y análisis de cada una de estas fracciones, también se hace la evaluación de los índices de humificación HR₁ y HR₂.

6.2.1 Análisis Físicos y Químicos para el compost maduro

Al finalizar el periodo de tres meses se realizaron nuevamente los análisis; los resultados se presentan en la tabla 4.

Tabla 4. Análisis físicos y químicos para el compost maduro

Humedad	pH	%C	%MO	%N	C/N	CIC mequ/100g	Acidez Al	Acidez Int.
11.8	7.4	15	25.9	1.48	10.14	56.5	0	3.13

Aquí se puede apreciar que el compost presentó al final del periodo de compostaje una humedad del 11.8 %; no se debe permitir mayor sequedad para impedir que se produzca el fenómeno de la diestéresis, que consiste en el resecamiento de la materia orgánica y formación de agregados a los cuales es difícil la penetración de raíces.

Se estima que hubo una gran transformación del material, ya que el porcentaje de materia orgánica pasó de un 48.3% a un 26%, lo que indica alta degradación. Además el porcentaje de materia orgánica final está dentro del rango aceptado para un compost maduro (25-30%). Al igual que el pH el cual se encuentra muy cercano a la neutralidad

También se puede ver que el porcentaje de nitrógeno aumentó confirmando que hubo mineralización de la materia orgánica. De otra parte se encuentra que la relación C/N es apropiada para un compost maduro. Al igual que se encontró una alta capacidad de intercambio catiónico (CIC) indicando que este compost presenta una buena capacidad para intercambiar bases y es probable que por tal motivo indique que el material presente un buen grado de humificación.

Otro factor importante es que este compost no presentó aluminio total y que la poca acidez intercambiable se debe posiblemente al hidrógeno proveniente de la materia orgánica.

De acuerdo al anterior análisis se puede inferir que el compost obtenido presenta unas condiciones apropiadas para ser utilizado como abono, ya que los parámetros como CIC y relación C/N reflejan un alto grado de maduración.

6.2.2 Análisis Físicos y Químicos para el Lombricompost maduro

Los resultados del análisis del Lombricompost al finalizar los tres meses se presentan en la tabla 5.

Tabla 5. Análisis Físicos y Químicos para el Lombricompost maduro

Humedad	pH	%C	%MO	%N	C/N	CIC mequ/100g	Acidez Al	Acidez Int.
10.4	7.2	15.5	26.7	1.18	13.02	60.7	0	0.42

En esta tabla se puede apreciar que al igual que en el compost la humedad es baja y por lo tanto no se debe permitir mayor secamiento. El pH, la materia orgánica, relación C/N, CIC representan valores apropiados para considerar el lombricompost como un abono orgánico.

Al comparar estos valores con los del compost se deduce que el lombricompost presenta una mayor CIC (60.7), una adecuada relación C/N al igual que la del compost. La cantidad de nitrógeno inferior en el lombricompost, podría deberse a la utilización de este elemento para la síntesis proteica de la lombriz roja californiana.

En cuanto a la acidez intercambiable, para el lombricompost se aprecia que ésta es mucho menor (0.42) que la del compost (3.13); sin embargo, en ninguno de los dos bioabonos existe acidez debida al aluminio. Esto indica probablemente que el proceso de maduración del lombricompost es mayor que el del compost; sin embargo, los dos bioabonos presentan condiciones apropiada para ser utilizados como abonos orgánicos, de acuerdo a Primavessi (3).

6.3 Separación de la Materia Orgánica Fresca y Materia Orgánica Humificada en los dos Bioabonos

La materia orgánica está constituida por una mezcla homogénea de complejos con amplia variedad de propiedades físicas y químicas. Dichos constituyentes son el producto de la descomposición biológica de los restos animales y vegetales de cualquier naturaleza.

El estado de descomposición es usado frecuentemente para clasificar la materia orgánica en: materia orgánica fresca (poco o no humificada) y materia orgánica humificada. La proporción relativa de cada fracción depende esencialmente de la actividad biológica del medio que se refleja en un mayor o menor grado de transformación de la materia orgánica.

Para la separación de estas fracciones de materia orgánica, se utiliza el método granulométrico, ya que este tratamiento produce el mínimo de desnaturalización y hace posible estudiar los compuestos orgánicos de las fracciones dispersables o no en agua.

La separación granulométrica se realizó partiendo de 35 gramos de bioabono seco. Cada uno de estos se pasó por tamices de 106 y 53 μ . Los resultados de la separación granulométrica se representan en la tabla 6 y figura 8.

Tabla 6. Distribución del porcentaje de las fracciones en la materia orgánica

Muestra	Fracción <50 μ MOH (g)	%	Fracción > 100 μ MOF (g)	%	Fracción 100-50 μ MOH (g)	%
Compost	10.74	30.7	15.45	44.2	8.64	24.7
Lombricompost	15.34	43.8	5.28	15.08	3.64	10.4

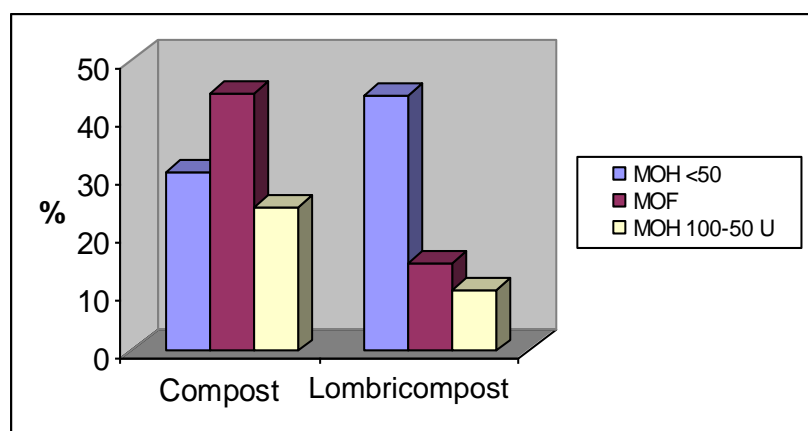


Figura 8. Distribución del porcentaje de las fracciones en la materia orgánica

En la tabla 6 y figura 8 se observa que en el compost la mayor parte de la materia orgánica es mayor de 100 μ (44.2%), lo que indica que gran parte de la materia orgánica no está completamente humificada y que por lo tanto en ese periodo de tiempo (3 meses) todavía no se ha terminado el proceso de humificación. Lo anterior se corrobora al observar el alto porcentaje de materia orgánica

comprendida entre 100-50 μ (24.7%) que corresponde a un estado intermedio de humificación.

En cuanto al lombricompost se ve que sucede lo contrario, ya que la mayor parte de materia orgánica es menor de 50 μ (43.8%) indicando un alto proceso de humificación en igual periodo de tiempo. También se observa que el porcentaje de materia orgánica comprendida entre 100-50 μ está muy cercano de la materia orgánica fresca, es decir, que es poco el material que falta por humificar; esto hace suponer que la humificación en el lombricompost es mejor, dado que las lombrices presentan una capacidad de mineralizar en un periodo de horas (37).

6.4 Análisis Químico de cada una de las Fracciones

Para evaluar el grado de humificación se hacen el análisis químico que comprende determinación de carbono en cada una de las fracciones.

6.4.1 Contenido de Carbono en cada una de las fracciones

A cada una de las fracciones separadas se les determinó el porcentaje de carbono con el objeto de evaluar la cantidad de materia orgánica presente en cada una de ellas y seguir de esta manera el proceso de humificación. Los datos se presentan en la tabla 7 y figura 9.

Tabla 7. Porcentaje de carbono para MOF y MOH

Muestra	% C MOH <50 μ	% C MOF >50 μ
Compost	15.64	28.6
Lombricompost	18.89	11.26

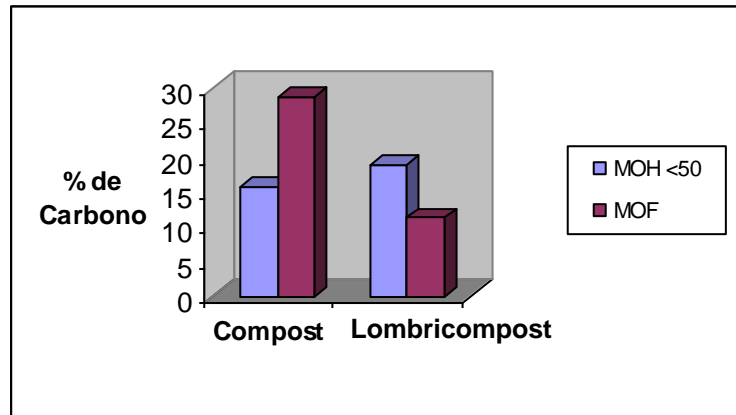


Figura 9. Porcentaje de carbono de MOH Y MOF para el compost y el lombricompost

Al observar la tabla 7 y figura 9 se deduce que en el lombricompost hay mayor cantidad de carbono en la materia orgánica humificada que en la materia orgánica fresca, mientras que para el compost hay mayor cantidad de carbono en la materia orgánica fresca que en la materia orgánica humificada. Lo que indica que en el compost la mayoría de los compuestos están aun sin humificar, mientras que en el lombricompost la mayor parte de la materia orgánica ha sido ya transformada, corroborando lo expuesto anteriormente.

6.5 Extracción y Separación de las Sustancias Húmicas en el Compost y Lombricompost

La separación y estudio de las sustancias similares a las sustancias húmicas (ácidos húmicos, ácidos fúlvicos y huminas) son conocidas hace varios años. Estas sustancias húmicas y en particular los ácidos húmicos se forman durante el proceso de humificación.

Esta etapa se refiere al estudio del humus propiamente dicho. Con el fin de minimizar las alteraciones químicas y obtener una extracción máxima, es necesario utilizar solventes polares con alta constante dieléctrica favoreciendo así la dispersión de las sustancias.

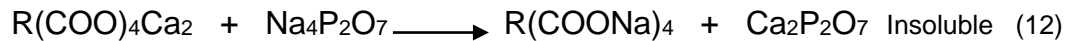
Con el objeto de evaluar el contenido de las sustancias húmicas extractables, de acuerdo con su unión organo-mineral, se realizó una extracción sucesiva con tetraborato de sodio 0.1 N pH 9.7, pirofosfato de sodio 0.1 N pH 9.8 e hidróxido de sodio 0.1 N pH12.

La eficiencia al efectuar la extracción con tetraborato de sodio, pirofosfato de sodio e hidróxido de sodio en forma sucesiva, se debe a que cada uno de ellos actúa sobre determinado tipo de unión organo-mineral permitiendo así una extracción más completa.

El orden de extracción es esencial, ya que el tetraborato de sodio actúa específicamente sobre enlaces electrostáticos los cuales se rompen fácilmente por simple intercambio iónico y permite una extracción más eficaz de los demás extractantes. La posible reacción que se presenta es la siguiente:



El pirofosfato de sodio actúa sobre enlaces de coordinación; aquí las reacciones químicas que tendrían lugar en el proceso de extracción serían:



El hidróxido de sodio actúa sobre enlaces órgano-minerales más fuertes que aun no han sido afectados por el tetraborato y el pirofosfato. Las reacciones químicas que suceden en esta extracción pueden representarse así: (39)



La separación de los ácidos húmicos de los ácidos fúlvicos se llevó a cabo sometiendo extractos de tetraborato de sodio, pirofosfato de sodio e hidróxido de sodio a precipitaciones con H_2SO_4 concentrado hasta pH1. Aquí precipitan los ácidos húmicos y quedan solubles los ácidos fúlvicos, los cuales por no estar purificados se llaman fracción fúlvica.

6.5.1 Extracción y Separación de las Sustancias Húmicas en el Lombricompost

Para realizar la extracción de las sustancias húmicas del lombricompost, se partió de cinco gramos de materia orgánica humificada (MOH), los resultados se muestran en la tabla 8 y figura 10, ahí se evalúan parámetros como porcentaje de carbono extraíble (% CE) que corresponde a las sustancias húmicas extraídas con cada extractante, porcentaje de carbono para ácidos húmicos, fracción fúlvica y ácidos fúlvicos (% de C para AH, AF y FF), e índice de humificación (HR_1).

Tabla 8. Efecto del extractante sobre el % C de AH y % C de FF para el Lombricompost

Extractante	% C extraíble	% C FF	% C AH	HR ₁
Tetraborato de sodio	0.67	0.39	1.07	5.53
Pirofosfato de sodio	0.63	0.15	1.75	
Hidróxido de sodio	0.77	0.29	1.77	
Sumatoria	2.07	0.83	4.59	

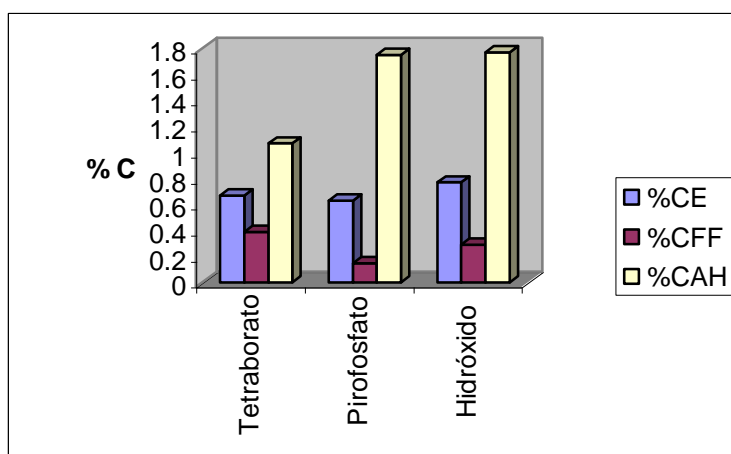


Figura 10. Efecto del extractante sobre el %Carbono de FF y AH para lombricompost

En la tabla 8 y figura 10 se observa que el mayor porcentaje de extracción de carbono extraíble fue con hidróxido de sodio (0.77%) y el menor con pirofosfato de sodio (0.63%). Como el hidróxido de sodio destruye casi todos los enlaces orgánico-minerales, se podría decir en principio que este abono presenta un alto grado de humificación. La eficiencia del hidróxido de sodio en la extracción de sustancias húmicas íntimamente ligadas al componente mineral, se debe

a que éstas en parte son descomplejadas por el pirofosfato; por lo que se puede afirmar que la acción del hidróxido de sodio está condicionada por los extractantes que le preceden. El valor de pH del hidróxido de sodio comparado con los extractantes usados previamente favorece el desplazamiento de iones hidrógeno, de los grupos carboxil e hidroxifenólicos, dando como resultado un alto porcentaje de carbono extraído (40).

En cuanto al porcentaje de carbono de la fracción fúlvica se observa que el tetraborato extrae la mayor cantidad de carbono (0.39%), indicando que aquí hay predominio de enlaces electrostáticos. Debido a que el tetraborato extrae sustancias húmicas de bajo peso molecular, es de esperarse este resultado, ya que los ácidos fúlvicos son moléculas menos condensadas, más móviles y, por lo tanto, se encuentran menos unidas a la fracción mineral.

Para el porcentaje de carbono de los ácidos húmicos se detecta que la mayor extracción se realizó con hidróxido de sodio (1.77%), corroborando lo expuesto anteriormente, ya que los ácidos húmicos son moléculas muy polimerizadas que se encuentran fuertemente unidas a la fracción mineral. Esto indica probablemente que el proceso de humificación en el lombricompost fue más consistente.

El valor del índice de humificación (HR_1), se obtiene de la sumatoria de fracción fúlvica y de los ácidos húmicos sin purificar. Este índice (HR_1) tiene un valor de 5.53 el cual es alto si se tienen en cuenta los valores 2.2 y 1.8 reportados por Bravo et al (2001) e Inbar et al (1990) respectivamente. Este alto índice de humificación señala inicialmente que el lombricompost presenta las condiciones adecuadas para ser utilizado como abono orgánico.

6.5.2 Extracción y Separación de las Sustancias Húmicas en el Compost

Al igual que para el lombricompost, para la extracción de sustancias húmicas en compost se partió de cinco gramos de materia orgánica humificada. Los resultados se muestran en la tabla 9 y figura 11.

Tabla 9. Efecto del extractante sobre el % C de AH y % C de AF para el compost

Extractante	% C extraíble	% C FF	% C AH	ΣC AH/C FF (HR ₁)
Tetraborato de sodio	1.03	0.431	1.47	6.7
Pirofosfato de sodio	0.77	0.086	1.50	
Hidróxido de sodio	0.14	0.019	0.60	
Sumatoria	1.94	0.536	3.57	

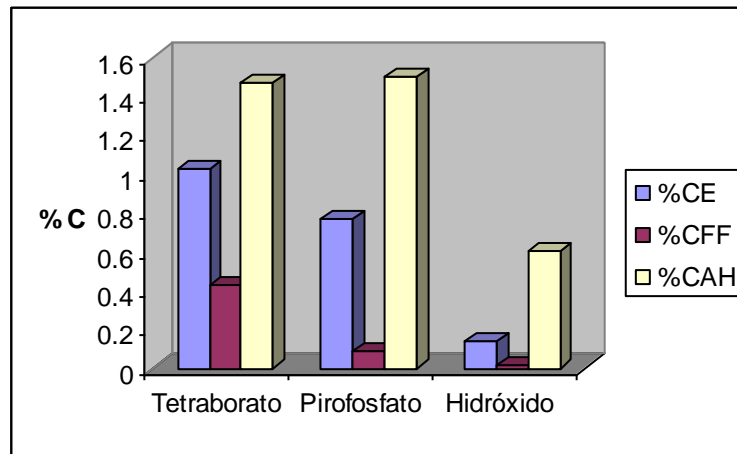


Figura 11. Efecto del extractante sobre el %C de AH y FF para el Compost

De la tabla 9 y figura 11, se puede deducir que el mayor porcentaje de carbono extraído se obtiene con el tetraborato y el menor con hidróxido de sodio, esto significa que en este humus se encuentran más sustancias con enlaces débiles o electrostáticos, los cuales se rompen por simple intercambio y menos sustancias con enlaces de coordinación; lo que podría indicar probablemente un grado de humificación mediano, ya que apenas se están formando uniones más fuertes.

En cuanto al porcentaje de carbono de la fracción fúlvica se puede apreciar que la mayor extracción se hace con tetraborato de sodio, ya que los ácidos fúlvicos son moléculas más solubles y por lo tanto más fácil de extraer porque tienen un menor grado de polimerización. Como el pirofosfato de sodio extrae sustancias con enlaces de coordinación más fuertes, se espera obtener mayor cantidad de ácidos húmicos que de ácidos fúlvicos con este extractante; que es lo que se observa en la tabla 9. Además los ácidos fúlvicos extraídos con hidróxido de sodio representan la menor cantidad, por las mismas razones expuestas anteriormente.

El valor del índice de humificación (HR_1) para el compost también es alto, lo que indicaría probablemente un alto grado de humificación; sin embargo, se debe realizar la purificación de la fracción fúlvica y de los ácidos húmicos para poder asegurar que el porcentaje de carbono obtenido se debe en realidad a cada una de las sustancias.

El valor del índice de humificación (HR_1), 6.70, para el compost es superior al encontrado en el lombricompost. Esto indicaría que el compost presenta un mejor índice de humificación, sin embargo, se deben tener en cuenta otros indicadores para corroborar esta apreciación

6.6 Purificación de los Ácidos Húmicos y Ácidos Fúlvicos en el Compost y Lombricompost y evaluación del Índice de Humificación HR₂

Cada uno de los sobrenadantes extraídos con tetraborato, pirofosfato e hidróxido de sodio fueron purificados y liofilizados. Después de liofilizar tanto a los ácidos húmicos como a los ácidos fúlvicos se les determinó el contenido de carbono con el fin de comprobar si realmente hubo purificación y además para determinar el índice de humificación HR₂.

Para la purificación de los ácidos fúlvicos se utilizaron en forma sucesiva resinas de adsorción, de intercambio catiónico y membranas de diálisis de 3500 daltons. Mientras que para purificar los ácidos húmicos se empleó la centrifugación a alta velocidad (12000 r.p.m.) y membranas de diálisis de 12000 daltons.

En la purificación de los ácidos fúlvicos primero se pasaron los extractos de tetraborato de sodio, pirofosfato de sodio e hidróxido de sodio por las resinas de adsorción XAD-16 empaquetadas en una columna de 10 mL con agua desionizada; sobre ésta se pasaron en promedio 200 mL de cada extracto, allí se retienen los ácidos fúlvicos debido a su tamaño molecular y se eliminan moléculas más pequeñas como el tetraborato y el pirofosfato de sodio. Una vez retenidas las sustancias húmicas, se procedió a eluir las de la resina con 100 mL de hidróxido de sodio 0.7N. la fracción fúlvica queda eluida en forma de fulvatos de sodio solamente, pues a través de la resina se habían eliminado el tetraborato y el pirofosfato de sodio.

La elusión se hizo con NaOH 0.7N para poder eluir la mayor cantidad de Sustancias Húmicas de la resina, pues éste reactivo debido a sus propiedades, retiene fuertemente este tipo de sustancias, y con concentraciones más bajas la elusión no era muy satisfactoria. Inclusive a esta concentración es apreciable que la resina que inicialmente es blanca, al final de la elusión queda con un tono

amarillento, mostrando un poco de sustancia retenida debido a su alta área superficial.

Como la concentración del NaOH es alta, los valores de pH del extracto pasado a través de la resina de Amberlita XAD-16 son altos como se observa en la columna I de la tabla 10.

Tabla 10. Resultados de purificación secuencial de Fracción Fúlvica

MUESTRA	pH de la solución eluida a través de Amberlita XAD-16 (I)	pH de la solución eluida a través de Rexyn 101 H (II)	pH eluido a través de Membrana de diálisis (III)
Lombricompost (T)	13.69	2.03	4.26
Lombricompost (P)	13.39	1.73	3.77
Lombricompost (Na)	13.34	1.85	3.90
Compost (T)	13.30	1.58	3.90
Compost (P)	13.32	1.79	3.97
Compost (Na)	13.25	1.73	3.63

Los extractos eluidos a través de la resina de adsorción están en forma de fulvatos de sodio y se pasan luego a través de una columna de 25 mL empaquetada con resina de intercambio catiónico (Rexyn 101H), previamente activada con HCl 1N. Estos fulvatos fueron eluidos con 50 mL de HCl 1N.

En la misma tabla, columna II se presentan los valores de pH de los fulvatos, ya eliminando el sodio y se puede apreciar que los valores de pH presentan una disminución, lo que indica la eliminación del hidróxido de sodio presente en cada extracto. Sin embargo, para poder liofilizar los ácidos fúlvicos es necesario eliminar algunas sales que todavía se encuentran en el extracto y el HCl sobrante, esto se hace a través de una membrana de diálisis de 3500 daltons, controlándose

constantemente el valor del pH. La diálisis se hizo hasta fin de cloruros encontrándose un tiempo promedio de diálisis de 48 horas, con valores de pH alrededor de 3.9; concordando con los reportados por Dávila (2002). Estos valores de pH se reportan en la tabla 10 columna III.

En cuanto a la purificación de los ácidos húmicos: Los ácidos húmicos obtenidos a partir de los extractos de tetraborato de sodio, pirofosfato de sodio e hidróxido de sodio en NaOH 0.5N fueron sometidos a continuas precipitaciones con HCl y redisoluciones con NaOH, con el fin de eliminar tanto impurezas inorgánicas como orgánicas ya que con los ácidos húmicos es probable que coprecipitan sustancias no húmicas (por ejemplo proteínas y carbohidratos), de diferente remoción debido a que en algunos casos están unidas covalentemente a una parte integral de la molécula.

Después de lavar el residuo de ácidos húmicos con HCl (diagrama 7) el precipitado se redisolvió en NaOH 0.1N; en la tabla 11 columna I se presentan los valores de pH de la fracción de ácidos húmicos antes de ser dializados. La diálisis se realizó para eliminar el hidróxido de sodio y se determinó que el tiempo medio para realizar la diálisis es de 72 horas, controlándose constantemente el pH. En la columna II se presentan los valores de pH después de dializar.

Tabla 11. Resultados de purificación secuencial de los Acidos Húmicos

MUESTRA	pH Acidos Húmicos en NaOH 0.1N I	pH Acidos Húmicos después de Diálisis II
Lombricompost (T)	13.26	3.22
Lombricompost (P)	13.25	3.21
Lombricompost (Na)	13.26	3.21
Compost (T)	13.26	3.29
Compost (P)	13.29	3.22
Compost (Na)	13.30	3.27

6.6.1 Purificación de los Acidos Húmicos y Acidos Fúlvicos en Lombricompost.

En la tabla 12 y figura 12 se presentan los resultados obtenidos en la purificación del lombricompost.

Comparando los valores de porcentaje de carbono de ácidos fúlvicos ya purificados con los porcentajes de carbono de la fracción fúlvica (tabla 8), se observa que los valores de carbono disminuyeron después de que se purificó la fracción fúlvica; esto mismo ocurre con el porcentaje de carbono de ácidos húmicos purificados y no purificados (tabla 8) en donde se ve una disminución del porcentaje de carbono después de la purificación, lo que indica que no todo el carbono evaluado en los ácidos húmicos (no purificados) y en la fracción fúlvica correspondía a carbono de los ácidos húmicos sino también probablemente a carbono perteneciente a moléculas como carbohidratos (monosacáridos, oligosacáridos, polisacáridos), proteínas, peptidos, ácidos nucleicos, grasas, ceras, entre otros; que no son ácidos húmicos, ni ácidos fúlvicos, pero que por mineralización pueden llegar a serlo, y que es posible que hayan pasado en la

fracción de materia orgánica humificada por uniones débiles con la fracción mineral. De esta consideración se puede deducir que en realidad estas sustancias fueron al menos parcialmente purificadas.

Tabla 12. Efecto del extractante sobre el % C de AH y % C de AF para el Lombricompost

Extractante	% C extraíble	% C AF	% C AH	HR ₂
Tetraborato de sodio	0.67	0.09	0.24	5.68
Pirofosfato de sodio	0.63	0.08	0.40	
Hidróxido de sodio	0.77	0.02	0.44	
Sumatoria	2.07	0.19	1.08	

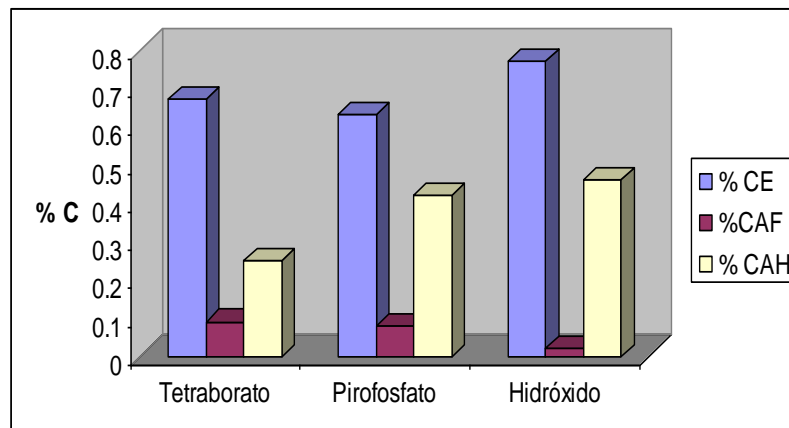


Figura 12. Efecto del extractante sobre el %C de AH y AF para el lombricompost

En la tabla 12 y figura 12 se observa que el mayor porcentaje de carbono para los ácidos fúlvicos se obtuvo con tetraborato de sodio (0.09%) y pirofosfato de sodio

(0.08%), lo que continua señalando el predominio de enlaces electrostáticos y de coordinación en este tipo de moléculas.

Para el porcentaje de carbono de ácidos húmicos los valores mayores se obtuvieron con pirofosfato de sodio (0.40%) e hidróxido de sodio (0.44%), resultado que concuerda con el anterior, ya que al ser los ácidos húmicos moléculas más policondensadas, es más difícil romper los enlaces. Esto sigue indicando que el abono del que provienen estos ácidos húmicos ha sufrido un buen proceso de transformación por parte de las lombrices y de los microorganismos que las rodean.

En cuanto al índice de humificación HR_2 (5.68) obtenido es superior al índice de humificación HR_1 , indicando que hay mayor presencia de ácidos húmicos y por lo tanto un alto grado de humificación; por lo tanto las características físicas y químicas presentes en el lombricompost son las óptimas para ser empleado como abono orgánico.

6.6.2 Purificación de los Ácidos Húmicos y Ácidos Fúlvicos en el Compost

En la tabla 13 y figura 13 se presentan los resultados obtenidos después de la purificación.

Al comparar el porcentaje de carbono de ácidos húmicos y ácidos fúlvicos purificados y no purificados (tabla 9) se observa que el porcentaje de carbono en general disminuyó considerablemente después de la purificación; atribuible lo mismo que en el lombricompost a que en el proceso de humificación se eliminan posibles sustancias que pasan a través del tamiz de malla 53 micras. Esto corrobora además que si hubo proceso de humificación.

Tabla 13. Efecto del extractante sobre el % C de AH y % C de AF para el Compost

Extractante	% C extraíble	% C AF	% C AH	HR ₂
Tetraborato de sodio	1.03	0.12	0.14	1.67
Pirofosfato de sodio	0.77	0.24	0.25	
Hidróxido de sodio	0.14	0.005	0.21	
Sumatoria	1.94	0.36	0.60	

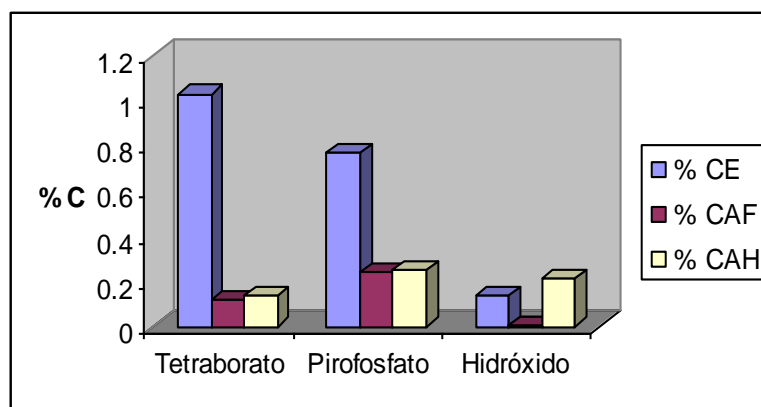


Figura 13. Efecto del extractante sobre el %C de AH y AF para el compost

En la tabla 13 y figura 13 se aprecia que el mayor porcentaje de carbono para ácidos fúlvicos se obtiene con pirofosfato de sodio (0.24%) y el menor con hidróxido de sodio (0.005%); indicando que hay predominio de enlaces de coordinación. Al comparar estos resultados con los del porcentaje de carbono de ácidos húmicos se deduce que no hay una diferencia marcada. Lo que podría

indicar que los ácidos fúlvicos se están polimerizando para formar los ácidos húmicos.

Para el porcentaje de carbono de ácidos húmicos se aprecia que los valores mayores se obtienen con pirofosfato de sodio (0.25%) e hidróxido de sodio (0.21%); señalando que hay predominio de enlaces de coordinación y enlaces más fuertes.

En cuanto al índice de humificación HR_2 , éste presenta un valor bajo (1.67) si se compara con el índice de humificación (HR_2) para el lombricompost. Esto quiere decir que el proceso de humificación aquí no fue muy consistente; aunque presenta unas condiciones adecuadas para ser empleado como abono orgánico.

6.7 Evaluación de la cantidad de Al retenido por la MO del compost y el lombricompost y por suelo adicionando estos dos materiales.

Para hacer este ensayo se utilizaron 180 mg de suelo, suelo sin materia orgánica, lombricompost, compost, suelo con compost y suelo con lombricompost cada uno de ellos en 200 mL de soluciones de $AlCl_3$ que contienen las diferentes dosis de aluminio suministrado (0.0, 3.0 meq, 15 meq y 30 meq por 100 g de material). De acuerdo a trabajos previos reportados por Narvaez et al (8).

Para evaluar la retención de aluminio en el suelo se tomó una muestra de suelo de la vereda Chisquío, municipio del Tambo, Departamento del Cauca. Dicho suelo presenta el análisis reportado en la tabla 14, donde se tienen en cuenta parámetros como textura, porcentaje de humedad (%H), pH, porcentaje de materia orgánica (% MO), porcentaje de nitrógeno, capacidad de intercambio catiónico (CIC), fósforo, calcio, magnesio y aluminio intercambiable (Al int).

Tabla 14. Análisis del suelo empleado en la evaluación de extracción de aluminio

Textura	Humedad (%)	pH	%N	%MO	C/N	CIC meq/ 100g	P (ppm)	Ca meq/ 100g	Mg meq/ 100g	Al int meq/ 100g
Franco-arenosa	8.95	5.45	0.57	6.26	6.37	40.96	1.1	1.28	0.65	0.52

Como se observa, el suelo empleado es fuertemente ácido (pH menor de 5.5) con un nivel medio de materia orgánica. Sin embargo, el aluminio intercambiable es bajo, atribuible a la retención por parte de la materia orgánica que atrapa el aluminio y no lo deja libre para que pase a la solución del suelo.

Este suelo presenta deficiencias de fósforo, calcio y magnesio. Su textura es franco arenosa, que indicaría una alerta por pérdida de bioestructura ya que ahí predomina el contenido de arena lo que puede conducir a erosión.

La relación C/N es muy baja y se pueden corregir, tanto su acidez como esta relación y la pérdida de bioestructura mediante la adición de abonos orgánicos bien humificados.

En la tabla 15 se presentan los resultados de la prueba de evaluación de retención de aluminio. En la figura 14 se representa el porcentaje de aluminio retenido por los diferentes materiales en función del aluminio ofrecido en las soluciones

Tabla 15. Extracción de aluminio por la materia orgánica en los diferentes materiales

Tratamiento	Al Sumistrado (meq/100g)	Al Equilibrio (meq/100g)	Al Retenido (meq/100g)	% Al retenido
Suelo	0.0	0.0	0.0	-
	3	0.0	3	100
	15	7.7648	7.2352	48.2347
	30	22.8494	7.1506	23.8353
Lombricompost	0.0	0.0	0.0	-
	3	0.0	3	100
	15	0.5	14.5	96.6667
	30	5.942	24.058	80.1934
Compost	0.0	0.0	0.0	-
	3	1.4352	1.5648	52.1617
	15	10.1908	4.8092	32.0617
	30	8.7932	21.2068	70.6893
Suelo+Compost	0.0	0.0	0.0	-
	3	0.0469	2.9531	98.4367
	15	4.7043	10.2957	68.6390
	30	29.4506	0.5494	50.9157
Suelo+Lombricompost	0.0	0.0	0.0	-
	3	0.0	3	100
	15	7.692	7.308	48.7203
	30	18.7469	11.2531	37.5104

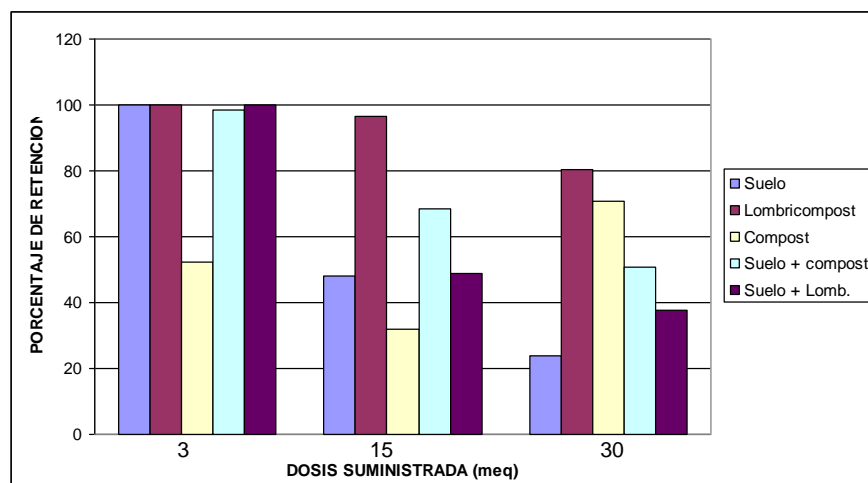


Figura 14. Porcentaje de retención de aluminio por los diferentes materiales

Al observar la tabla 15 y figura 14 se deduce que cuando se aplican al suelo dosis intermedias de aluminio, pero que causan toxicidad (3 meq), este retiene completamente los 3 meq. Sin embargo, a medida que se aumentan las dosis de aluminio a cantidades supremamente tóxicas (15 y 30 meq) se observa que sigue habiendo retención pero en menor proporción, lo que indica una saturación de los grupos COO^- y OH^- de la materia orgánica del suelo que al ínter actuar con las cargas negativas de las arcillas hacen que se retengan cationes como el Al^{+3} .

Para el lombricompost en la tabla 15 se aprecia que para la dosis de 3 meq la retención es del 100%; cuando se aumenta la dosis hay disminución en el porcentaje de retención. De la tabla también se deduce que la retención del lombricompost es mayor si se compara con la retención del suelo solo, indicando probablemente que hay mayor disponibilidad de retención de este material debido al predominio de cargas negativas (COO^- y OH^-) y a la capacidad de intercambio catiónico, corroborando lo encontrado anteriormente ya que el lombricompost presenta un buen grado de humificación.

En general en todos los tratamientos se detecta que al aumentar las dosis de aluminio disminuye el porcentaje de retención, indicando saturación de grupos retenedores a excepción del compost en la dosis de 30 meq donde la retención aumenta indicando posiblemente un acomodamiento de los cationes de Al^{+3} dentro de la estructura lo que le impide salir a la solución del suelo; con esto se confirmaría que el compost aún no tiene un buen grado de humificación que le permita retener aluminio de igual forma que el lombricompost.

Para realizar la evaluación de la retención de aluminio por parte del suelo mezclado con materia orgánica se tuvo en cuenta el porcentaje de materia orgánica del compost y del lombricompost. El porcentaje de materia orgánica de la mezcla se llevó a 9.5% para el compost y 9.0% para el lombricompost. Después de mezcladas se maceró y se homogeneizó.

Si se comparan los porcentajes de retención del suelo solo, compost solo y la mezcla de los dos se aprecia que la retención es mayor en la mezcla, debido probablemente a la formación de compuestos organominerales que retienen más cantidad del aluminio, con mayor estabilidad debido al proceso de cementación por parte de la materia orgánica.

Comparando la retención de aluminio por el suelo solo, lombricompost y en suelo con lombricompost se deduce que hay mayor retención en la mezcla de suelo con lombricompost debido a la formación de compuestos organominerales a través del aluminio entre la fracción mineral y la fracción orgánica. Sin embargo, el lombricompost presenta mayor retención, lo que indicaría que este sistema con su alto grado de humificación es capaz de retener más aluminio.

Posteriormente se le destruyó la materia orgánica al suelo con H_2O_2 con el objeto de evaluar si una vez destruida esa materia orgánica el suelo seguía reteniendo

aluminio. Se encontró inicialmente que para destruir la materia orgánica presente en 20.038 g de suelo se emplearon aproximadamente 65 mL de H₂O₂ al 37%.

Después de destruida la materia orgánica del suelo se determinó el porcentaje de materia orgánica comprobando que efectivamente había sido destruida en un 86.42% ya que el valor pasó de 6.26% a 0.85%. La posible reacción llevada a cabo en el proceso sería:



Cuando se aplica aluminio a un suelo que se le ha destruido la materia orgánica en lugar de presentar retención hay desorción de este elemento.

En la tabla 16 se presentan los resultados de prueba de desorción de aluminio por el suelo sin materia orgánica.

Tabla 16. Desorción de aluminio por el suelo sin materia orgánica

Tratamiento	Al Sumistrado (meq/100g)	Al Equilibrio (meq/100g)	Al desorbido (meq/100g)	% Al desorbido
	0	25.8401	-25.8401	-
Suelo sin Materia	3	21.2414	-4.5987	-153.2900
Orgánica	15	17.1246	-8.715	-58.1033
	30	6.1446	-19.6955	-65.6516

En la tabla 16 se aprecia que cuando no se aplica aluminio a este suelo, se presenta liberación de aluminio a la solución del suelo, dicha liberación se representa con un signo negativo, lo que indica que hay desorción debido al rompimiento de la interacción entre la materia orgánica y la fracción mineral. Dicho rompimiento deteriora así la bioestructura del suelo por ruptura de la cementación,

quedando las arcillas en proceso de floculación, así las interacciones entre el aluminio son lábiles y se afectan fácilmente cambiando las condiciones externas y por lo tanto liberando fácilmente aluminio a la solución del suelo. En la tabla también se nota que a mayor aluminio suministrado hay mayor desorción.

Dado que en las tablas 15 y 16 se observan diferencias en la capacidad de retención de aluminio cuando al suelo se le destruye la materia orgánica o cuando se aplican dosis adecuadas de materia orgánica en forma de compost o de lombricompost se hizo un análisis estadístico, el cual consiste en un análisis de varianza (ANOVA); con tres dosis, (3, 15 y 30 meq/100g suelo), para seis tratamientos (suelo, suelo sin materia orgánica, lombricompost, compost, suelo con compost y suelo con lombricompost) y dos replicas por cada tratamiento, también se realizó una prueba de Duncan.

En la tabla 17 se presenta el análisis de varianza (ANOVA) para los diferentes tratamientos así como, las dosis aplicadas.

Tabla 17. Resultados de la Prueba de Análisis de Varianza para los Tratamientos y las dosis

Fuente	Suma de cuadrados Tipo III	gl	Media cuadrática	F	Significancia
Modelo corregido	4426.923 ^a	23	192.475	212.178	.000
Intersección	1721.982	1	1721.982	1898.253	.000
Tratamiento	337.765	5	67.553	74.468	.000
Aluminio	2782.742	3	927.581	1022.532	.000
Tratamiento*Al	1306.416	15	87.094	96.010	.000
Error	21.771	24	.907		
Total	6170.676	48			
Total corregido	4448.694	47			

^a. R cuadrado = .995 (R cuadrado corregido = .990)

En esta tabla se señala la prueba de análisis de varianza (ANOVA) que indica una alta significancia debido a los altos valores de F denotando diferencias altamente significativas, así como una alta interacción entre tratamientos y entre dosis.

Por lo anterior, en la estadística se tiene en cuenta la interacción entre los tratamientos y las dosis de aluminio, ya que estas son variables dependientes.

En la tabla 18 se relaciona solamente los tratamientos con respecto a la retención, con un intervalo de confianza del 95%, sus respectivas medias y errores típicos.

Tabla 18. Tratamientos de aluminio con respecto a la retención

Tratamientos	Media	Error Típico	Intervalo de confianza al 95%	
			Límite inferior	Límite superior
Suelo	4.346	.337	3.651	5.041
Suelo sin MO	-14.7123	.337	-18.8983	-18.8093
Lombricompost	10.390	.337	9.695	11.084
Compost	6.895	.337	6.200	7.590
Suelo con compost	5.390	.337	4.695	6.085
Suelo con lombricompost	7.131	.337	6.436	7.826

En la tabla 19 se relacionan solamente las dosis aplicadas con respecto a la retención de aluminio.

Tabla19. Dosis aplicadas respecto a la retención de aluminio

Dosis	N	Media	Desviación típica	Error típico	Intervalo de confianza para la media al 95%		Mínimo	Máxim
					Límite inferior	Límite superior		
0	12	-4.3067	10.0645	2.9054	-10.7014	2.0880	-26.67	.00
3	12	3.0194	.9224	.2663	2.4334	3.6055	1.34	4.70
15	12	8.8106	3.1948	.9222	6.7808	10.8405	4.32	15.00
30	12	16.4348	6.2529	1.8051	12.4619	20.4077	7.00	24.06
Total	48	5.9895	9.7290	1.4043	3.1645	8.8145	-26.67	24.06

En las tablas anteriores se encuentran diferencias entre los tratamientos y las dosis aplicadas.

Como el ANOVA indica una diferencia altamente significativa entre los tratamientos y las dosis y una interacción entre los tratamientos y dosis se realiza la prueba de DUNCAN para saber entre cuales tratamientos hay diferencias.

En la tabla 20 se muestra la prueba de DUNCAN para los tratamientos.

Tabla 20. Resultados de la prueba de Duncan para los tratamientos

Tratamientos	N	Subconjunto				
		1	2	3	4	5
Suelo sin MO	8	-14.7123				
Suelo	8		4.3465			
Suelo con compost	8			5.3903		
Compost	8				6.8952	
Suelo con Lombric	8				7.1309	
Lombricompost	8					10.3895
Significancia		1.000	1.000	1.000	1.000	1.000

Se detectan cinco grupos, el quinto corresponde al lombricompost que presenta la mayor retención de aluminio (10.3895 meq) con una diferencia estadísticamente significativa con respecto a los otros tratamientos, confirmando de esta manera lo descrito cualitativamente en la valoración del grado de humificación, donde se encontró que el lombricompost presenta mayor grado de humificación y por lo tanto tiene mayor grado de retención de aluminio, ya que por presentar mayor número de grupos –COOH y OH que permiten la polimerización de moléculas de ácidos húmicos; esto implica la quelatación y/o acomplejamiento del Al^{+3} , de otra parte este abono presenta mayor CIC que le permite retener mayor número de cargas positivas y por lo tanto puede retener más aluminio.

En el cuarto grupo se encuentra el suelo con lombricompost y el compost; indicando que entre estos dos materiales no existe una diferencia estadísticamente significativa. Sin embargo, se aprecia que el suelo con lombricompost presenta un valor mayor de retención probablemente debido a la formación de uniones organominerales entre el suelo y la materia orgánica.

En el tercer grupo se encuentra la mezcla de suelo con compost, el hecho de que esta mezcla se encuentre en un grupo inferior a la mezcla de suelo con lombricompost confirma lo dicho anteriormente, en cuanto a que el compost presenta un menor grado de humificación y por lo tanto una menor capacidad de retener aluminio.

En el segundo grupo está el suelo solo, lo que era de esperarse, ya que el contenido de materia orgánica era medio comparado con la materia orgánica de los otros tratamientos. De la anterior tabla se deduce que el suelo por sí solo retiene en promedio 4.34 meq de aluminio y cuando se mezcla suelo con cantidades adecuadas de compost y/o lombricompost la capacidad de retener aluminio se incrementa; esto es favorable puesto que se podría inferir que una

forma de contrarrestar los efectos tóxicos del aluminio en el suelo sería mediante la aplicación de materiales orgánicos pero con un buen grado de humificación.

También se confirma que la retención de aluminio en este suelo se hace a través de la unión entre la materia orgánica y la fracción mineral, ya que si se destruye la materia orgánica del suelo, este lo libera a la solución.

7. CONCLUSIONES

7.1 La mezcla de los materiales a compostar presentó condiciones óptimas para dicho proceso.

7.2 Tanto el compost obtenido como el lombricompost presentan propiedades adecuadas para ser considerados como abonos orgánicos, de acuerdo a normas establecidas por el ICONTEC y de acuerdo a normas brasileras.

7.3 El lombricompost en relación con el compost presenta mayor cantidad de materia orgánica humificada, mayor índice de humificación(HR_2), mayor capacidad de intercambio catiónico, menor acidez intercambiable, mayor porcentaje de carbono extraíble, mayor porcentaje de carbono de ácidos húmicos y menor porcentaje de carbono de ácidos fúlvicos, propiedades que indican mejor grado de humificación en el lombricompost y por lo tanto mejor calidad.

7.4 Los anteriores parámetros indican que en el compost existe menor grado de humificación y que por lo tanto el proceso de maduración aun no ha terminado en el período de tres meses.

7.5 En el lombricompost el mayor porcentaje de extracción de ácidos húmicos se hizo con hidróxido de sodio, probablemente, debido a la fuertes uniones organominerales existentes. Mientras que para la fracción fúlvica el mayor porcentaje de extracción se presentó con tetraborato de sodio, porque estos presentan moléculas menos condensadas y se encuentran menos unidas a la fracción mineral.

7.6. En el compost el mayor porcentaje de extracción de ácidos húmicos se realizó con pirofosfato de sodio lo que indica que se están formando uniones más o menos fuertes. Para la fracción fúlvica el mayor porcentaje de extracción fue con tetraborato de sodio ya que con este extractante se rompen uniones más débiles.

7.7 Se consiguió la separación de la materia orgánica humificada de la no humificada mediante la técnica granulométrica a partir de abonos orgánicos a través de tamizado en húmedo en tamizador mecánico (Retsch).

7.8 Se logró implementar la metodología para la extracción, separación, purificación y cuantificación de sustancias húmicas (similares al humus) a partir de abonos orgánicos como el compost y lombricompost.

7.9 Se consiguió una buena purificación de ácidos fúlvicos con la utilización de resinas de adsorción (Amberlita XAD-16), resinas de intercambio iónico (Rexyn 101), membranas de diálisis de 3500 daltons y liofilización

7.10 Se logró la separación y purificación de ácidos húmicos mediante precipitación con ácido sulfúrico a pH 2, centrifugación a alta velocidad y lavado con ácido clorhídrico y ácido fluorhídrico. posterior diálisis a través de membranas de celulosa de 12000 daltons.

7.11 Los abonos orgánicos presentaron alta saturación de aluminio, existiendo una relación directa entre el grado de humificación y el porcentaje de retención; por lo tanto el lombricompost presenta una mayor retención.

7.12 La adición de compost y/o lombricompost al suelo mejoraron su capacidad de retención de Aluminio.

7.13 La mezcla de suelo con lombricompost presentó mayor retención de Aluminio que la mezcla de suelo con compost debido precisamente al mayor grado de humificación del lombricompost.

7.14 Se pudo comprobar la importancia de la materia orgánica en el suelo, ya que su eliminación conduce a la desorción de Aluminio lo que causa problemas de toxicidad tanto a los microorganismos como a las plantas.

7.15 Con la realización de este trabajo se logró el conocimiento y la aplicación de varias técnicas analíticas como la espectrofotometría de absorción atómica, diálisis, liofilización, centrifugación a alta velocidad entre otras.

BIBLIOGRAFÍA

1. QUINTERO, Victor. SUARES, Alvaro. La acidez y la retención de fósforo en los suelos del valle de samaca. 1970. Trabajo de grado (Ingeniero Agrónomo). Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia. p. 3
2. CASTRO, Omar. Evaluación de dos métodos rápidos de laboratorio para determinar la tolerancia diferencial del maíz a toxicidad de Al y su correlación con experiencias de campo. Villavicencio, 1.983. Trabajo de grado (Agrónomo). Universidad Tecnológica de los Llanos Orientales. p. 7.
3. PRIMAVESI, Ana. Manejo ecológico del suelo. Quinta edición. Argentina: El ateneo, 1.982. p. 100
4. NARVAEZ, C. GOMEZ, C. ROJAS, Remoción de aluminio en soluciones acuosas por materiales orgánicos de uso agrícola. En: Suelos Ecuatoriales. Colombia. Vol 30. Nº 2. Diciembre 2000. p. 132-140
5. Sociedad Colombiana de Ciencia del Suelo. FERTILIDAD DE SUELOS, Diagnóstico y control. Colombia: Editorial Guadalupe. 1.994. p. 306.
6. CAMARGO, Alfonso. GAMBOA, Luis Hernando. RINCON, Arnold. Efecto de los correctivos en la fijación, fraccionamiento y asimilación de P en tres suelos ácidos del altiplano cundiboyacence. Boyaca, 1.977, Trabajo de grado (Agrónomo). Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia. p. 16-17.
7. CASTRO, Op. cit., p. 8-10.

8. NARVAEZ, C. GOMEZ, C. ROJAS, L. Efecto de los materiales orgánicos caupí, gallinaza y compost sobre el aluminio intercambiable del suelo y el desarrollo de un cultivo de maíz. En: Suelos Ecuatoriales. Colombia. Vol 30. N° 2. Diciembre 2000. p. 125-131.
9. MALAGON, Dimas. LLINAS, Ruben. CHAMORRO, Clara. Suelos de Colombia. Origen, evolución, clasificación, distribución y uso. Santafé de Bogotá:IGAC, 1.995. p. 107-109.
10. BRAVO, Isabel. GIRALDO, Efrén. GARCES, Paula. Biotransformación de algunos residuos agroindustriales y evaluación de su proceso de humificación. En: Suelos ecuatoriales. Colombia. Vol 31. N° 2. Diciembre de 2001. Pág. 146-151.
11. PRIMAVESI, Op. cit., p. 100
12. Sociedad Colombiana de Ciencia del Suelo, Op. cit., p. 190-192
13. FERRAR, G. Fractionation of the organic matter of soil by gel filtration through sephadex. University of Padua. Italia. 1980. Pág. 418-421.
14. Edafología. Ciencias Ambientales. Componentes del suelo. Fase sólida. Componentes orgánicos. Humificación. Available from Internet <http://www.unex.e/edafo/ECAL4#SCOhumification.htm>. Actualizada 2 de abril de 2001.
15. Soil Science Society of America. Glossary of soil science terms. Soil Science Soc. Am Proc. 1965. p. 330
16. MALAGON, Op. cit., p. 108-109

17. Edafología. Ciencias Ambientales. Propiedades del suelo. Propiedades físico químicas. intercambio iónico. Available from Internet www.unex.e/edafo/ECAL5#ScoHumificacion.htm .. Actualizada 13 de mayo de 2001
18. DORADO,E. ALMENDROS,G. Extracción y caracterización de las sustancias húmicas en las fracciones físicas del suelo. Real Sociedad Española de la Historia Natural. p. 5-28.1979
19. FUJUKATE,N.; KUSUMOTO, A. Properties of soil humic substances in fractions obtained by sequential extraction with pyrophosphate solutions at different pHs. Soil Sci Plant Nutr. 44(2) p. 253-260.
20. Métodos Analíticos del Laboratorio de Suelos. Instituto Geográfico “Agustín Codazzi”. Quinta edición. Subdivisión de Agrología. Santafé de Bogotá. Colombia. 1990. p. 455-499.
21. MALAGON, Op. cit., p. 310-311
22. PRIMAVESSI, Op. cit., p. 101
23. VELASCO, F. MINGO, P. Distribución de materia orgánica libre y ligada de las fracciones de humina de suelos climáticos y suelos degradados. Anales de edafología agrobiología. Diciembre de 1980. P. 179-189.
24. Desarrollo Histórico de la Investigación del Humus en el Suelo. Available from Internet www.infoagro.compost/agricultura-ecologica13asp
25. Métodos Analíticos de Laboratorio. Op. cit., p. 464-465.

26. Ibid p. 483
27. FERRARI, G. Molecular sizes and functional groups of humic substances extracted by 0.1M pyrophosphate from soil aggregates of different stability. *Journal of Soil Science* 22(3):342-349. 1971
28. DAVILA, J. Caracterización preliminar de ácidos fúlvicos de dos suelos colombianos. Popayán, 2002. Trabajo de grado (Químico). Universidad del Cauca. p. 19-21
29. RUIZ., Omar. Sustancias Húmicas e Índices de Humificación. En: Congreso Agroquímica, Universidad Nacional de Colombia. (2003 : Medellín). Memorias Congreso Agroquímica, Universidad Nacional del Colombia. Medellín 2003.
30. Memorias curso de abonos y sustratos orgánicos. Universidad Nacional de Colombia. 1.996. Colombia.
31. NARVAEZ, C. GOMEZ, C. ROJAS, L. Remoción de aluminio en soluciones acuosas por materiales orgánicos de uso agrícola. En: suelos Ecuatoriales. Colombia, 2000. Vol. 30:2. p. 132-140.
32. R, RICARDO, Op. cit., p 83-110
33. CEGARRA, J. Compostaje de desechos orgánicos y criterios de calidad del compost. Memorias del VII congreso Colombiano de la Ciencia del Suelo. 1.994. Bucaramanga. p. 22-30
34. T, HILARY. V, SAMUEL. Gestión Integral de Residuos Sólidos. Tercera edición: Estados Unidos. McGraw Hill. 1994. p 342

- 35.** CEGARRA. Op. cit., p. 33
- 36.** CORAL, F. Características orgánicas, físicas y químicas de humus de lombríz.
En: Agro Enfoque. Lima Perú 1996. Edición 78. P. 28-30
- 37.** BRAVO, Isabel. GIRALDO, Efrén. Manual de prácticas de química agrícola:
análisis de suelos. Universidad del Cauca, 1.999. Popayán.
- 38.** T, HILARY. Op. cit., p. 777-779
- 39.** Dávila, J. Op. cit., p 61-63
- 40.** BARRAGAN, C. URIBE, M. Selectividad de tres agentes extractantes
tetraaborato de sodio, pirofosfato de sodio e hidróxido de sodio en la extracción
de sustancias húmicas en suelos de la amazonia. Universidad Distrital
Francisco José de Caldas. Departamento de Ciencias de la Educación.
Proyecto curricular de Licenciatura en Química. Santafé de Bogotá. 1999.

RECOMENDACIONES

- Debido a que el estudio de la desorción o liberación de aluminio solo se realizó a un solo tiempo, se recomienda hacer el estudio de la adsorción de aluminio en función del tiempo, con el objeto de mirar la cinética de adsorción
- Se recomienda implementar un método para lograr la evaporación del agua del tamizaje en húmedo en el proceso de separación de la materia orgánica humificada de la no humificada, puesto que la evaporación de altas cantidades de agua es muy dispendiosa.