

**INCREMENTO EN LA DISPONIBILIDAD DE FÓSFORO Y OBTENCIÓN DE UN
FERTILIZANTE LÍQUIDO A PARTIR DE GALLINAZAS**

OSCAR FERNEY LUCERO TORRES

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

**INCREMENTO EN LA DISPONIBILIDAD DE FÓSFORO Y OBTENCIÓN DE UN
FERTILIZANTE LÍQUIDO A PARTIR DE GALLINAZAS**

OSCAR FERNEY LUCERO TORRES

**Trabajo de grado presentado como requisito parcial para optar al título de
Químico**

Directora: M.Sc. ISABEL BRAVO REALPE

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

Nota de Aceptación

Directora
MSc. ISABEL BRAVO REALPE

JURADO.
PhD. FABIO ANTONIO CABEZAS F.

JURADO.
MSc. OSWALDO COLLAZOS.

Fecha de sustentación: Popayán, 11 de Mayo de 2010.

DEDICATORIA.

A mis padres por ser un siempre el apoyo incondicional y gracias a Dios me bendijo con los que tengo , por aconsejarme, quienes con su amor, esfuerzo y devoción fueron los principales gestores de mi triunfo.

A mi mamá, por darme su amor cariño compromiso y comprensión por enseñarme y dedicarme su tiempo con el cual forjo mi camino y mi futuro

A mi papá por enseñarme desde muy pequeño que la mejor herencia que puede tener es la educación por su dedicación amor y sacrificio

A mis hermanos por acompañarme e el proceso que cumplí y que logre

A mi novia Leidy Shirley por entregarme su amor y cariño condicional por convertirse en la persona que compartirá muchos triunfos mas a mi lado durante la historia de mi vida.

AGRADECIMIENTOS ESPECIALES

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

A los Jurados por su recepción y colaboración en el mismo.

A mis profesores, por compartir sus conocimientos, por guiarme en el camino correcto durante mi formación académica.

Al profesor Fabio Cabezas por ser un excelente en su labor, por sus anécdotas por sus consejos y por su amistad

A mi amigo Luis Carlos por brindarme su amistad por que desde que empezamos este camino el siempre estuvo desde el inicio hasta el final por ser una amigo incondicional en todas las circunstancias gracias Kaliche

A mi amigo Fransico porque las amistades sinceras perduran gracias Frank

A mis verdaderos amigos Lizbeth, Viviana , Anderson, Luis, Cristian por todos los momentos buenos y amenos

A mis compañeros de Agroquímica:, por brindarme su colaboración desinteresada y no escatimar su tiempo cada vez que la necesitaba.

Finalmente quiero agradecer a todas y cada una de las personas que de una u otra manera fueron partícipes y me brindaron su colaboración desinteresadamente en la realización de este trabajo.

Contenido.

	pág.
2. RESUMEN.	1
3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.	2
4. OBJETIVOS.	3
4.1. OBJETIVO GENERAL.	3
4.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.	3
5. FUNDAMENTO TEÓRICO Y ESTADO DEL ARTE.	4
5.1. 5.1. Fósforo.	4
5.1.1. Origen del fósforo	4
5.1.2. Formas de fósforo en el suelo.	4
5.1.2.1. Fósforo Orgánico.	5
5.1.2.2. Fósforo Inorgánico.	7
5.1.3. Pérdidas y ganancias.	8
5.1.4. Transformaciones Químicas del Fósforo en el Suelo.	9
5.1.4.1. Fijación de Fósforo.	10
5.1.4.2. Mecanismos de precipitación de fosfatos de calcio.	11
5.1.4.3. Sustitución isomórfica.	12
5.1.4.4. Reacciones de doble descomposición.	13
5.1.4.5. Adsorción superficial.	13
5.1.5. Isoterma de Langmuir.	16
5.1.6. Disponibilidad del fósforo para las plantas.	19
5.1.6.1. Factores que afectan la disponibilidad de fósforo para las plantas.	19
5.1.7.1. Abonos orgánicos.	21
5.1.8. Importancia de los abonos orgánicos.	21
5.1.8.1. Propiedades de los abonos orgánicos.	22
5.1.9. Gallinaza.	23
5.1.9.1. Gallinaza: residuo orgánico.	23
5.1.9.2. Calidad de la gallinaza.	24
5.1.9.3. Producción de gallinaza.	24
5.1.10. Materia orgánica.	25
5.1.10.1 Efectos Químicos.	28

·		
5.1.10.2	Efectos Físicos.	29
·		
5.1.10.3	Efectos Biológicos.	30
·		
5.1.10.4	Ácidos Húmicos.	30
·		
5.1.10.5	Ácidos Fúlvicos.	31
·		
5.1.10.6		
·	Huminas.	32
5.1.11.	Evaluación del índice de humificación.	32
5.1.12.	Acido cítrico.	33
5.1.12.1	Obtención del ácido cítrico.	33
·		
5.1.12.2	Ciclo de Krebs.	33
·		
5.1.12.3	Formación del acido cítrico.	34
·		
6.	METODOLOGÍA.	34
6.1.	UBICACIÓN GEOGRÁFICA	34
6.2.	TOMA DE MUESTRAS.	34
6.3.	EVALUACIÓN DE LA GALLINAZA DE ACUERDO A LA NORMA ICONTEC DE204/02.	35
6.3.1.	Determinación de humedad.	35
6.3.2.	Pérdidas por Volatilización y Cenizas (%).	35
6.3.3.	Determinación de la densidad.	35
6.3.4.	Determinación del % saturación de agua.	35
6.3.5.	Determinación de la conductividad eléctrica:	36
6.3.6.	Determinación del pH	36
6.3.7.	Determinación del contenido de carbón Orgánico total:	36
6.3.8.	Determinación del contenido de nitrógeno: se determina por el método de Kjeldhal:	37
6.3.9.	Determinación del contenido total de Potasio Calcio, Magnesio y Sodio:	37
6.3.10.	Determinación del contenido total de micronutrientes: Cu, Mn, Fe, Zn:	37
6.3.11.	Determinación del contenido de Bases de cambio:	38

6.3.12.	Determinación de la capacidad de intercambio catiónico:	38
6.4	EVALUACIÓN DEL FÓSFORO DISPONIBLE	38
6.5.	EVALUACIÓN DEL FÓSFORO ORGÁNICO	39
6.6.	DETERMINACIÓN DE FÓSFORO TOTAL.	39
6.7.	Caracterización de la fracción húmica.	39
6.8.	EVALUACIÓN DE LA FORMA DE INCREMENTAR LA DISPONIBILIDAD DE FÓSFORO EN LA GALLINAZA.	40
6.8.1.	Extracción Del Fosforo En Forma Soluble A Partir De La Muestra De Gallinaza Con Ácido Cítrico.	40
6.8.2.	Extracción Del Fosforo En Forma Soluble A Partir De La Muestra De Gallinaza Mediante Encalamiento Con Dolomita.	41
6.9.	Tratamiento Estadístico	42
7.	RESULTADOS Y ANÁLISIS	43
7.1.	Valoración de las propiedades Físicas	44
7.1.1.	Porcentaje de cenizas.	44
7.1.2.	Densidad.	44
7.1.3.	Humedad en Base Seca.	44
7.1.4.	Porcentaje de Saturación o Capacidad de Retención de Agua.	44
7.1.5.	Conductividad Eléctrica.	44
7.1.6.	Pérdidas por Volatilización.	45
7.2.	Valoración de las propiedades Químicas.	45
7.2.1.	pH.	45
7.2.2.	Capacidad de Intercambio Catiónico.	45
7.2.3.	Materia Orgánica.	45
7.2.4.	Nitrógeno.	46
7.2.5.	Fósforo.	46
7.2.6.	Contenido de K ₂ O.	47
7.2.7.	Contenido de CaO.	47
7.2.8.	Contenido de MgO.	48
7.2.9	ΣNPK.	48

7.2.10.	Contenido de Na.	48
7.2.11.	Microelementos.	48
7.2.12.	Evaluación del grado de Humificación.	49
7.3.	EXTRACCIÓN DEL FOSFORO EN FORMA SOLUBLE A PARTIR DE LA MUESTRA DE GALLINAZA.	50
7.3.1.	Efecto del tratamiento de la Gallinaza Con ácido Cítrico sobre el pH	52
7.4.	EVALUACIÓN DEL EFECTO DE ENCALAMIENTO CON DOLOMITA SOBRE LA DISPONIBILIDAD DE P EN LA GALLINAZA	56
7.4.1.	Efecto del encalamiento de gallinaza sobre la disponibilidad de P	59
8	CONCLUSIONES	64
9	REFERENCIAS BIBLIOGRAFÍA	65
10	OTRAS REFERENCIAS	69

Lista de tablas.

		pág.
Tabla 1.	Estimación de deyecciones de las ponedoras.	27
Tabla 2.	Preparación de la curva de calibración de sacarosa.	36
Tabla 3.	Caracterización de la gallinaza obtenida comercialmente.	43
Tabla 4.	Valoración del Sustancia Húmicas Presentes en la Gallinaza	49
Tabla 5.	Extracción de fósforo con diferentes concentraciones de ácido.	52
Tabla 6.	Efecto del tratamiento de la gallinaza con ácido cítrico sobre el pH.	54
Tabla 7.	Pruebas de normalidad para el tratamiento con ácido cítrico.	54
Tabla 8.	Prueba de ANOVA para el tratamiento con acido cítrico.	55
Tabla 9.	Prueba de Duncan P Disponible (ppm) para el tratamiento con acido cítrico.	55
Tabla 10.	Prueba de Duncan para el pH.	56
Tabla 11.	Prueba de Pearson Correlaciones para el tratamiento con ácido cítrico.	57
Tabla 12.	Datos de Requerimiento de cal en gallinaza.	57
Tabla 13.	Pruebas de normalidad Datos de Encalamiento.	58
Tabla 14.	Prueba de Kruskal-Wallis para Encalamiento.	58
Tabla 15.	Prueba de HSD de Tukey para encalamiento.	59
Tabla 16.	Extracción de P en función del Encalamiento.	61
Tabla 17.	Pruebas de normalidad Extracción de P con encalamiento.	61
Tabla 18.	Prueba de Kruskal-Wallis para datos de Extracción de P con encalamiento.	61
Tabla 19.	Prueba Tukey P disponible con encalamiento.	62
Tabla 20.	Correlación de Rho de Spearman.	63

Lista de figuras.

	pág.
Figura 1. Estructura del fitato con diferentes interacciones	6
Figura 2. Adsorción de fósforo en minerales de arcilla 1:1.	14
Figura 3. Reacción de adsorción de fósforo sobre minerales de Hierro.	15
Figura 4. Representación gráfica de la adsorción de Fósforo.	18
Figura 5. Composición Química de la Materia Orgánica de un Compost.	25
Figura 6. Formación de los Precursores Húmicos.	26
Figura 7. Proceso de formación de las Sustancias Húmicas.	27
Figura 8. Lamina de arcilla.	28
Figura 9. Condensación de Acetil CoA en oxaloacetato por acción de citrato sintetasa.	34
Figura 10. Marcha analítica para la caracterización de la fracción húmica en materiales orgánicos.	40
Figura 11. Esquema de Diseño estadístico de Tratamiento de gallinaza con Acido Cítrico.	41
Figura 12. Fosforo Extraído con Ácido Cítrico.	51
Figura 13. Reacción del fitato con acido cítrico .	52
Figura 14. Efecto del acido cítrico sobre el pH de la suspensión.	53
Figura 15. Requerimiento de cal de la Gallinaza.	57
Figura 16. Proceso de humificación y mineralización de la materia orgánica.	58
Figura 17. Efecto del encalamiento de gallinaza sobre la disponibilidad de P.	60

Lista de acrónimos.

SH	Sustancias Húmicas.
AH	Ácidos Húmicos.
AF	Ácidos Fúlvicos.
FF	Fracción Fúlvica.
C/N	Relación Carbono/ Nitrógeno.
Gall.	Gallinaza.
MO	Materia Orgánica.
MOF	Materia orgánica fresca.
MOH	Materia orgánica humificada.
UV	Ultravioleta_visible.
CIC	Capacidad de intercambio catiónico.
pH	Potencial de Hidrógeno.
HR₁, HR	Relaciones de humificación.
CAH	Carbono de Ácidos Húmicos.
CAF	Carbono de Ácidos Fúlvicos.
CFF	Carbono de Fracción Fúlvica.
C	Carbono.
Al	Aluminio.
N	Nitrógeno.
P	Fósforo.
Na	Sodio.
Ca	Cálcio.
K	Potasio.
Fe	Hierro.
Cu	Cobre.
Mg	Magnesio.
Mn	Manganeso.
Zn	Zinc.

2. RESUMEN

El propósito de este trabajo fue verificar el aumento en la disponibilidad de fósforo en gallinazas mediante procesos químicos y obtener así un fertilizante líquido. Para ello, se realizaron tratamientos de gallinaza obtenida en los almacenes agropecuarios del Barrio Bolívar de Popayán, con ácido cítrico en diferentes concentraciones con el fin de extraer el P orgánico presente en ella y convertirlo en forma soluble. Además se aplicó el método de encalamiento con cal dolomita en diferentes proporciones

Inicialmente se caracterizó física y químicamente la gallinaza obtenida de acuerdo a los protocolos establecidos por la Norma ICONTEC NTC 5167/2003 y debidamente estandarizados en el laboratorio de Agroquímica, determinando su contenido nutricional en forma de nutrientes totales y disponibles, así como evaluando su extracto húmico en diferentes formas. Se encontró que la gallinaza analizada se puede catalogar como un abono orgánico, fuente de la mayoría de nutrientes esenciales, con excepción del Cu, para el desarrollo de los cultivos. Aún cuando el contenido de extracto húmico total, lo mismo que el grado de Humificación son altos, el C de sustancias similares a los ácidos fúlvicos supera considerablemente al C de sustancias similares al de ácidos Húmicos, generando así posible problemas de contaminación y erosión en suelos.

Se evaluaron dos formas de incrementar la disponibilidad de P en la gallinaza: El tratamiento con ácido cítrico que consistió en ensayos de hidrólisis y extracción con el propósito de quelatar metales que estén insolubilizando el P y de esta manera permitir su liberación para su posterior solubilización. Se ensayan diferentes concentraciones del ácido mencionado, incubando una muestra de gallinaza con dichas soluciones a diferentes tiempos con agitación mecánica y recíproca a 250 rpm durante 6 horas. Se evalúa en ellas el P soluble mediante método colorimétrico a 660 nm. Se utiliza para esto un diseño estadístico completamente aleatorio con 6 tratamientos consistentes en las dosis de ácido a aplicar con 3 réplicas por dosis, utilizando el método en paralelo, para un total de 18 tratamientos. El tratamiento con ácido cítrico logró extraer altos contenidos de P incrementando la solubilidad del P entre un 237% y 468%. Se considera como dosis adecuada la correspondiente a 100g de ácido cítrico/kg de gallinaza, para obtener una extracción óptima de P.

Otra forma fue mediante el Proceso de encalamiento que se hace de acuerdo al requerimiento de cal con dolomita, evaluando P soluble mediante método colorimétrico para cada punto de pH alcanzado. El encalamiento produce un efecto contrario al del ácido cítrico, ya que a medida que aumenta la dosis de cal aplicada disminuye considerablemente la cantidad de Fósforo soluble entre un 80% y 83%.

3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.

El fósforo (P) es vital para el desarrollo adecuado de las plantas, está involucrado en varias funciones claves que incluyen transferencia de energía, fotosíntesis, transformación de azúcares y almidones, transporte de nutrientes a través de la planta y transferencia de las características genéticas de una generación a otra. Por esta razón el fósforo se clasifica como un nutriente primario, requiriéndolo los cultivos en cantidades relativamente altas.

Debido a sus características químicas este nutriente se puede precipitar en el suelo a diferentes valores de pH quedando indisponible para la nutrición de las plantas; en suelos calizos (pH alto) el fósforo se insolubiliza formando fosfatos de calcio. En suelos ácidos, los fosfatos también resultan insolubilizados en forma de fosfatos de aluminio o de hierro, además se puede adsorber en la superficie de las arcillas por intercambio aniónico o se puede sustituir isomórficamente dentro de ellas.

Con base en las anteriores consideraciones, en todo tipo de suelos se presenta baja disponibilidad de este elemento y la única solución es agregar fertilizantes ricos en fosfatos al suelo en cantidades apreciables para suplir esta necesidad. Su aplicación en exceso o continua generalmente acidifica los suelos, altera sus propiedades físicas, químicas y biológicas. De esta manera favorece la erosión y afecta los organismos (flora y fauna), además por procesos de lixiviación el P aplicado llega hasta los cuerpos de agua del nivel freático pasando luego a sus fuentes primarias como ríos o lagos, causando así problemas de contaminación severa, por procesos de eutrofización.

De otra parte, debido al alto costo de los fertilizantes y a problemas ecológicos producidos por estos, se está generalizando últimamente, la sustitución de estos fertilizantes por fuentes orgánicas tales como la gallinaza, cuya fuente de fósforo es principalmente el ácido fítico, (hexafosfato de mioinositol o de sus isómeros) forma estable, cuyas sales de Ca, Mg y otros metales son poco solubles, por lo tanto no disponible inmediatamente para las plantas. Para su solubilización se requiere el proceso de mineralización bioquímica por los microorganismos del suelo en condiciones adecuadas. Su aplicación en altas cantidades (hasta 18 ton/ha) para poder reemplazar a una fuente mineral de P genera consecuencias negativas para el suelo puesto que su carga microbial altera los microorganismos propios del suelo, acelera procesos de mineralización de su materia orgánica nativa, de esta manera conlleva a procesos de erosión y generación de altas dosis de CO₂, gas que produce efecto invernadero.

4. OBJETIVOS.

4.1. OBJETIVO GENERAL.

Aumentar la disponibilidad de fósforo en gallinaza obtenida de una fuente comercial mediante procesos químicos y obtener un fertilizante líquido fuente de este nutriente a partir de gallinaza.

4.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.

- Evaluar la gallinaza comercial en forma de abono orgánico de acuerdo a la Norma Icontec NTC 5167/2003
- Evaluar el contenido de fósforo orgánico, disponible y total en la muestra de gallinaza.
- Evaluar la forma de incrementar la disponibilidad de P en la gallinaza mediante procesos de enclamiento y extracción con ácidos orgánicos
- Preparar un fertilizante líquido fuente de fósforo a partir de la muestra de gallinaza

5. FUNDAMENTO TEORICO Y ESTADO DEL ARTE.

5.1. Fósforo.

El fósforo es un elemento fundamental para la nutrición de las plantas. Es absorbido por éstas en forma de fosfatos mono y diácidos. ^[1]

A diferencia del nitrógeno y del azufre, elementos que se absorben también en forma aniónica, el fósforo es un elemento poco móvil, por su tendencia a reaccionar con cationes como calcio, magnesio y aluminio, produciendo formas no disponibles para las plantas. ^[1]

Aunque las plantas lo requieren en menor cantidad que el nitrógeno, potasio, y calcio, tiene como factor limitativo más importancia que el calcio y quizás más que el potasio. ^[2,3] Es un elemento que da calidad y precocidad a las plantas, ya que adelanta la maduración, a diferencia del nitrógeno, que tiende a prolongar el crecimiento vegetativo. Cumple un rol plástico, porque se encuentra en toda la planta, y especialmente en los tejidos jóvenes y órganos de reserva. ^[4] En los primeros interviene en la síntesis proteica y contribuye al desarrollo radicular, en los órganos de reserva (semillas y tubérculos) forma parte de fosfolípidos y ácidos nucleicos. También cumple un rol metabólico, ya que desempeña un papel indispensable como acumulador de energía y combustible para todas las actividades bioquímicas de las células vivientes al formar parte del adenosín trifosfato (ATP). ^[1]

5.1.1. Origen del fosforo.

La fuente original de fósforo es el material madre, constituido por rocas fosfatadas, tales como apatita, fluorapatita, vivianita, etc. Constituye aproximadamente el 0,12% de la corteza terrestre. La cantidad de fósforo total de la capa arable de un suelo agrícola (suma del fósforo orgánico e inorgánico) no está relacionada directamente con la disponibilidad. ^[4]

5.1.2. Formas de fósforo en el suelo.

Desde el punto de vista del material que aporta el nutriente, el fósforo del suelo comprende dos grandes formas: fósforo orgánico y fósforo inorgánico. ^[3]

5.1.2.1. Fósforo Orgánico.

La principal fuente está constituida por residuos vegetales y animales del suelo. Los compuestos fosfatados más importantes de la materia orgánica son ácido fítico, nucleoproteínas, fosfolípidos y fosfoazúcares. ^[3]

La mineralización de la materia orgánica es lenta por vía microbiana, requiriendo temperaturas de aproximadamente 25 a 30 °C, pH neutro y humedad cercana a capacidad de campo. El proceso de mineralización está regido por la relación C/P de la materia orgánica, cuyo valor crítico es aproximadamente 200. Por encima de este valor se produce depresión del fosfato inorgánico (fenómeno similar al de la depresión de los nitratos). [4]

El ácido fítico y sus sales constituyen la principal forma de almacenamiento de fósforo (P) en semillas de cereales y leguminosas. [5,6] Sin embargo, en esta forma el P permanece no disponible para el hombre y animales monogástricos, [7-8] debido a que éstos no están provistos de suficiente actividad de fosfatasas endógenas (fitasas) que sean capaces de liberar el grupo fosfato de la estructura del fitato [5] El ácido fítico es además un compuesto con actividad antinutricional, debido a su capacidad de formar complejos insolubles con minerales y proteínas [6,9] convirtiéndolos en no asimilables por el organismo bajo condiciones fisiológicas. [10,11] Paradójicamente, el ácido fítico, a bajas dosis, presenta también efectos positivos sobre la salud como son su acción protectora frente al cáncer, reducción de la formación de cálculos renales y prevención de enfermedades cardiovasculares. [12]

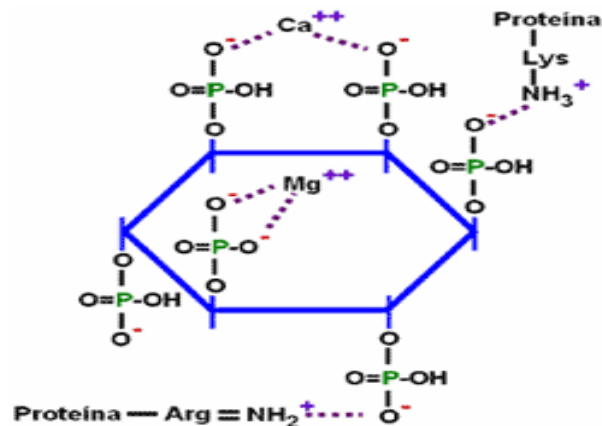
En los últimos años, la divulgación dada a los potenciales efectos beneficiosos de dietas bajas en grasas y con alto contenido de fibra, ha supuesto un fuerte empuje en el uso de leguminosas y semillas en grano en la alimentación humana [13]. Estos cambios en los hábitos alimentarios hacia una alimentación rica en fibra han conducido a una mayor ingesta de fitatos en la dieta, [14] No obstante, es importante considerar que durante el procesado de los alimentos y la digestión, la cantidad final de ácido fítico disminuye significativamente, [15] como consecuencia de su hidrólisis, enzimática o química. [16, 17,18]

➤ Estructura química y propiedades del ácido fítico.

Se han propuesto varios modelos para la estructura del ácido fítico. Según el modelo propuesto por Anderson, [19] el ácido fítico sería una molécula con seis grupos ortofosfato (InsP6), de nombre químico *myo-inositol* 1, 2, 3, 4, 5, 6 - *hexakis* (dihidrógeno fosfato). [20,21] Según esta estructura, el ácido fítico, a pH neutro y al pH que normalmente presentan los alimentos, es una molécula cargada negativamente, razón por la cual es considerado como un nucleófilo y por tanto muy reactiva, por lo que presenta una elevada capacidad para formar complejos o unirse a moléculas cargadas positivamente como cationes o proteínas puede ser aprovechado para quelatar metales pesados utilizados en los cultivos como en el caso de fungicidas y herbicidas. [22,23] La interacción del ácido fítico con las proteínas es pH-dependiente, mientras que con los cationes la interacción es debida exclusivamente a sus numerosos grupos fosfato: éstos pueden unirse bien a un sólo grupo fosfato, a dos grupos fosfato de una misma molécula o a grupos fosfato de distintas moléculas de ácido fítico (figura 1). [24,25] En la semilla el ácido fítico se encuentra como una mezcla de sales con varios cationes como K, Mg,

Ca, Mn, Zn y Fe,^[26] el término fitina se ha empleado para designar una mezcla de sales de Ca y Mg del ácido fítico.

Figura 1. Estructura del fitato con diferentes interacciones



La "insolubilidad" del ácido fítico es la principal causa de su comportamiento antinutricional y de sus propiedades fisicoquímicas.^[27,28] Sin embargo, es importante considerar que la solubilidad de las sales del ácido fítico varía con el pH, ya que el grado de protonación de los grupos fosfato que no se han unido a los metales está en función de dicho parámetro.^[29] Aparentemente, en la semilla el ácido fítico se encuentra como sales relativamente solubles de Na o K más que como fitina insoluble^[30]. Las sales de Ca y Mg son solubles a pH bajos e insolubles a pH elevados, por lo tanto a pH fisiológico serían insolubles, de ahí el descenso de la biodisponibilidad mineral. En general, las sales hidrogenadas y monovalentes del ácido fítico son solubles en agua, mientras que las sales metálicas divalentes y trivalentes son bastante insolubles.^[31]

El grado de interacción entre ácido fítico y proteínas es dependiente de la carga neta de la proteína, de su conformación y de las interacciones con minerales a un pH dado.^[22, 32,33] A bajo pH, por debajo del punto isoeléctrico de las proteínas, éstas se encuentran cargadas positivamente y el ácido fítico negativamente. En estas condiciones, se produce una fuerte interacción electrostática entre grupos amino terminal de las proteínas, y ésteres fosfato aniónico del ácido fítico, formándose un complejo binario,^[20,22] (figura 1). A pH intermedio, por encima del punto isoeléctrico de las proteínas, dado que la carga de las proteínas al igual que la del ácido fítico es negativa, su interacción sería imposible, sin embargo si puede realizarse a través de la formación de un complejo ternario con cationes divalentes como el Ca²⁺ o el Mg²⁺ (figura 1). Esta unión se realiza a través de los grupos carboxilos ionizados y el grupo imidazol desprotonado de la histidina, siendo necesaria una concentración mínima de estos cationes para mantener estos complejos.^[22] A pH intermedio también pueden existir algunos complejos binarios,

ya que a dicho pH los residuos lisil y arginil de las proteínas están aún cargados positivamente. A pH elevado la interacción entre las proteínas y el ácido fítico disminuye, los grupos lisil y arginil pierden su carga, y por tanto su capacidad de formar complejos binarios. Los complejos ternarios se desestabilizan ya que la fuerza iónica aumenta a pH elevado; un incremento en la concentración del ión Na hace que la reacción de equilibrio del complejo ternario se desplace hacia la derecha liberándose fitato cálcico insoluble y proteína-Na soluble (figura 1). [20,22] Como hemos visto la formación de complejos entre ácido fítico y proteínas no sólo afecta a la solubilidad y propiedades funcionales de las mismas, sino que también tiene una gran influencia en la biodisponibilidad mineral. [34] Además, el ácido fítico puede unirse también al almidón, bien directamente a través de puentes de hidrógeno o indirectamente mediante las proteínas a las que se asocia. [31]

5.1.2.2. Fósforo Inorgánico.

Desde el punto de vista edafológico interesa clasificarlo de acuerdo a su disponibilidad mediata o inmediata para las plantas en: fósforo soluble, intercambiable e insoluble. [2]

➤ Fósforo soluble.

Corresponde a las formas aprovechables para las plantas en forma inmediata, es decir son fosfatos en la solución del suelo. Su concentración es muy débil y fluctúa entre 0,2 y 0,5 mg/L, o sea 200 a 400 g/ha en 30 centímetros de espesor. En suelos muy ricos la concentración puede llegar hasta 1 mg/L (1ppm) y en suelos pobres a 0,1 mg/L. Generalmente es una concentración constante y permanece así aunque varíe la relación suelo-agua. [1,3]

Las formas solubles de fósforo en el suelo son los fosfatos diácidos (H_2PO_4^-) y monoácidos (HPO_4^{2-}). La concentración de los iones fosfatos en solución está relacionada con el pH de la misma. El ion H_2PO_4^- es favorecido por los pH bajos, mientras que el ion HPO_4^- por los pH más altos. [1,3]

➤ Fósforo intercambiable.

Representan del 15 al 30% del fósforo inorgánico, lo que significa 800 a 2500 kg de P_2O_5 /ha. Es también llamado fósforo lábil o adsorbido, y su disponibilidad es más lenta que el anterior. La adsorción de fosfatos, como en general toda adsorción aniónica en el suelo, es un fenómeno que depende del pH. A valores de pH ácido aumentan las cargas positivas de los coloides y por ende, aumenta la adsorción. Estos iones forman parte del enjambre de iones que rodean a las partículas coloidales y están en constante movimiento. [2]

Este fósforo lábil puede estar adsorbido directamente por los bordes de las arcillas (cuando están tienen cargas positivas como la caolinita a bajos valores de pH), o por uniones que usan al calcio como puente (en las arcillas de tipo 2:1). También

puede estar adsorbido por los óxidos e hidróxidos de hierro y aluminio, que tienen un poder de fijación mucho mayor que el de las arcillas. ^[2]

➤ **Fósforo insoluble.**

Forma parte de los minerales primarios y secundarios, y constituye la gran reserva de fósforo inorgánico en el suelo. La insolubilización se atribuye a la precipitación como fosfatos cálcicos en medio alcalinos, o como fosfatos de hierro y aluminio en medio ácido. Tanto en suelos ácidos como alcalinos, el fósforo tiende a sufrir una cadena de reacciones que producen compuestos fosforados de baja solubilidad. Por lo tanto, durante el largo tiempo que el fósforo permanece en el suelo, las formas menos solubles, y por ende las menos disponibles para la planta, tienden a aumentar. Cuando se agrega fósforo soluble al suelo, usualmente ocurre una rápida reacción (de unas pocas horas) que remueve el fósforo de la solución (fija el fósforo). Lentas reacciones posteriores continúan gradualmente reduciendo la solubilidad durante meses o años, según la edad de los compuestos fosfatados. El fósforo recientemente fijado puede ser débilmente soluble y de algún valor para las plantas. Con el tiempo, la solubilidad del fósforo fijado tiende a decrecer a niveles extremadamente bajos. Este fenómeno se conoce como envejecimiento del fósforo. ^[2]

5.1.3. Pérdidas y ganancias.

Las principales vías de pérdida de fósforo del sistema suelo son: la remoción por la planta (5 a 60 kg/ha año en la biomasa cosechada), la erosión de las partículas de suelo que arrastran fósforo (0,1 a 10 kg/ha año en partículas minerales y orgánicas), y el fósforo disuelto en el agua de escurrimiento superficial (0,01 a 3 kg/ha año). Para cada una de estas formas de pérdida, las cifras más grandes de pérdida anual citadas podrían ser aplicadas a los suelos cultivados. Una vez que la tierra se incorpora al uso agrícola, las pérdidas de fósforo en las partículas de suelo, en el agua de escurrimiento y en la biomasa removida por las cosechas, pueden ser sustanciales. En unos pocos años el sistema puede perder la mayor parte del fósforo reciclado entre las plantas y el suelo. El fósforo inorgánico remanente en el suelo no está disponible para las plantas. De este modo, la capacidad de reposición de fósforo en estos suelos perturbados comienza a disminuir tan rápidamente que la recuperación de la vegetación natural es pobre, o en las tierras desmontadas para uso agrícola, muy pronto los cultivos disminuyen sus rendimientos. ^[1,3]

La cantidad de fósforo que ingresa al suelo desde la atmósfera (adsorbido en las partículas de polvo) es muy pequeña (0,05 a 0,5 kg/ha año), pero puede balancearse con las pérdidas en los ecosistemas de bosques vírgenes o de pasturas naturales. ^[3]

A diferencia de los compuestos nitrogenados producidos durante el ciclo del N (amonios, nitratos, etc.), el fósforo adicionado a los sistemas acuáticos desde el suelo no es tóxico para los peces, el ganado o los humanos. El crecimiento no deseado de algas y de malezas acuáticas, término llamado eutrofización, puede crear en los reservorios de agua dulce un ambiente insatisfactorio para los peces y puede hacer que el agua de bebida se torne no potable. [4]

Por defecto o por exceso puede causar severos impactos negativos en la calidad ambiental. Los principales problemas ambientales relacionados al fósforo del suelo son la degradación de tierras causada por la escasa cantidad de fósforo disponible y la eutrofización acelerada causada por el exceso del mismo. Ambos problemas están relacionados al rol del fósforo como un nutriente de la planta. [1]

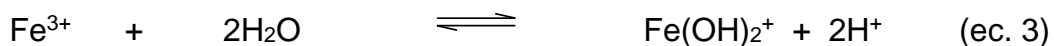
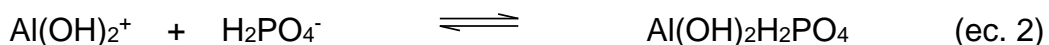
Hay probablemente 1 a 2 billones de tierras en el mundo en las que la deficiencia de fósforo limita el crecimiento de los cultivos y de la vegetación natural. La mayor parte de estas tierras se encuentran en países pobres, cuyos agricultores tienen poco dinero para fertilizantes. Sin un manejo apropiado de la fertilidad fosfórica, se puede esperar muy poca recuperación de la productividad de esas tierras, y por ende de la prosperidad de sus habitantes. Para detener y revertir este tipo de degradación de tierras se requerirá un buen manejo del ciclo del fósforo para hacer un uso eficiente de los escasos recursos. [2,3]

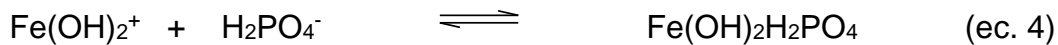
5.1.4. Transformaciones Químicas del Fósforo en el Suelo.

La dinámica del fósforo en el suelo depende en gran medida de la acidez del suelo medida por su pH y por la concentración de iones como Al, Mn, Fe y Ca. La forma del ión fosfato en solución varía con el pH. [1,3]

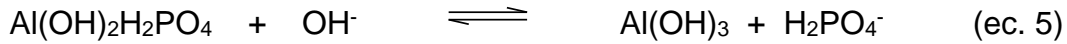
De acuerdo a la disociación del ácido fosfórico y a la ecuación de Henderson Hasselbach: $pH = pKa + \log B/A$, donde B y A son las bases y ácidos conjugados respectivamente, puede deducirse que a pH 6 un 94% del fósforo soluble, se encontrará como $H_2PO_4^-$, pero a pH 7 sólo el 60% estará en esta forma. [3]

Cuando el pH baja, el fosfato se fija dando lugar a compuestos insolubles de fósforo con hierro y aluminio. La fijación es mayor a valores de pH menores a 5. Algunas reacciones de insolubilización del fosfato con cationes de hierro y aluminio se presentan en las ecuaciones 1 a 4. [1,3]





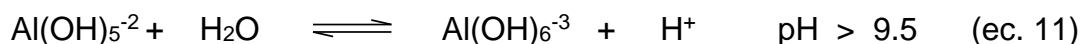
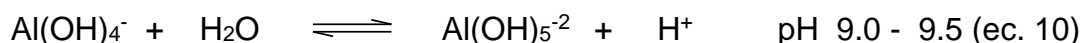
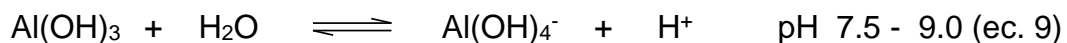
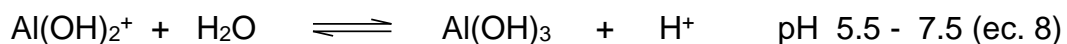
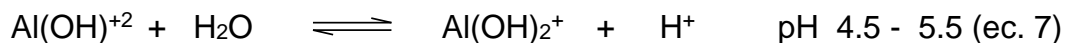
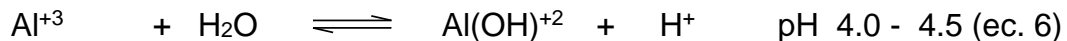
Al aumentar el pH por encima de 5.5, el fósforo se hace más soluble aumentando su disponibilidad y se expresa mediante la ecuación 5:



Los fosfatos de aluminio y hierro tienden a acumularse en suelos ácidos, mientras que los fosfatos de calcio predominan en suelos alcalinos. El rango de pH de 6 a 7 es el mejor desde el punto de vista de disponibilidad de este elemento para la planta, ya que en este rango el aluminio y el hierro están precipitados como hidróxidos y el fosfato está en solución. Por encima de pH 7, los fosfatos de calcio se vuelven insolubles. [4]

El comportamiento del aluminio en el suelo condiciona las características de los suelos ácidos. La existencia en forma soluble de las distintas especies de aluminio depende del intervalo de pH del suelo y de la fuerza iónica. Existen formas intercambiables: el Al^{3+} , y las resultantes de su hidrólisis, Al(OH)^{2+} , Al(OH)^{+2} . Formas precipitadas como el Al(OH)_3 , y formas aniónicas tales como Al(OH)^{-4} y Al(OH)^{2-5} y Al(OH)_6^{3-} . [1]

El origen de la acidez del suelo se halla en la hidrólisis de los iones aluminio en todo el rango de pH como se demuestra en las siguientes ecuaciones 6 a 11. [3]



5.1.4.1. Fijación de Fósforo.

El proceso por el cual los fosfatos solubles, generalmente aplicados en forma de fertilizante, pasan a formas menos solubles a través de su reacción con partículas orgánicas e inorgánicas del suelo, se conoce como retención o fijación de fósforo. Como consecuencia, se restringe la movilidad del fósforo en el suelo y disminuye su posibilidad de ser absorbido por las plantas. [1,3]

La deficiencia de fósforo en algunos suelos constituye una de las limitantes nutricionales de trascendencia en la producción de algunos cultivos. La importancia de este hecho está ligada no sólo al bajo contenido de fósforo disponible, sino también a la capacidad de fijar el fósforo proveniente del fertilizante a formas altamente insolubles. [4]

La fijación comprende reacciones de adsorción y de precipitación, predominando una u otra forma según la concentración en la solución de equilibrio, el tiempo de reacción y los minerales constituyentes, no siendo posible diferenciarlos analítica ni matemáticamente. [1]

En suelos ácidos, la adsorción de fósforo está generalmente atribuida a los “óxidos” e “hidróxidos” de hierro y aluminio y a otras propiedades del suelo. Este fenómeno ha sido estudiado a través de isotermas de adsorción ajustada a modelos matemáticos como los de Langmuir ó Freundlich. Se propone un tratamiento similar al de la ecuación de Langmuir de dos superficies, haciendo uso de una combinación de ambas ecuaciones. [4]

Se ha encontrado una relación estrecha entre la acidez del medio y la fijación de los fosfatos. El decrecimiento del pH está asociado con la formación de compuestos de hierro y aluminio difícilmente solubles, mientras que el aumento del pH se asocia con la formación de fosfatos cálcicos y en menor proporción de fosfatos magnésicos. Cuando la reacción es ligeramente ácida a neutra, los fosfatos solubles pasan fundamentalmente a fosfato tricálcico y con el tiempo a moroxilapatita, que es la forma más estable de los fosfatos minerales. [1,3]

5.1.4.2. Mecanismos de precipitación de fosfatos de calcio.

Cuando caen al suelo húmedo granos de fosfato monocálcico o superfosfato triple, estos gránulos se rodean de agua y comienzan a disolverse; paralela a la disolución hay también una reacción química en la cual el fosfato monocálcico se convierte a fosfato dicálcico hidratado y ácido fosfórico como se muestra en la ecuación 12. [1,2]



Con la producción de H_3PO_4 y de fosfato dicálcico, se baja el pH del sistema a 1.01. El fosfato de calcio se deshidrata y se alcanza un estado estable de equilibrio entre los tres fosfatos conocido como “solución del punto triple” (STP) en el que coexisten: fosfatos monocálcico, dicálcico y ácido fosfórico. [1,3]

Debido a la alta acidez y a la expansión de la solución que contiene los fosfatos, se van disociando sales del suelo y liberando cationes como Al^{3+} , Fe^{2+} , Mn^{2+} , Ca^{2+} , K^+ , NH_4^+ . La interacción del sistema de fosfatos con el suelo circundante y con los

cationes, incrementan el pH y presentan reacciones entre fosfatos y cationes que origina la precipitación de fosfatos cristalinos o amorfos pocos solubles de Ca, Fe y Al. [2]

En suelos que van de ligeramente ácidos a ligeramente alcalinos, las sales de fosfato que predominan son los difosfatos de calcio, y de magnesio dihidratados, quedando durante mucho tiempo en forma asimilable para todos los cultivos, pero luego comienzan una sustitución gradual del protón en estos difosfatos formando trifosfato de calcio y magnesio respectivamente y otros fosfatos de mayor basicidad, (ecuaciones 13 -14). [4]



Estas sales se precipitan en estado amorfo y su fosfato todavía es susceptible de solubilización en ácidos ligeros, quedando en forma parcialmente asimilable por las plantas. [1,3]

5.1.4.3. Sustitución isomórfica.

Los iones fosfatos (número de coordinación 4), encajan bien en los sitios ocupados por los tetraedros de silicio de los silicatos. Es de esperarse que cuando se aplican fosfatos al suelo ocurra algún grado de sustitución de fósforo por sílice en los enrejados arcillosos. [3]

Otra forma de sustitución isomórfica se presenta al intercambiarse el ión fosfato, por iones hidroxilo en el enrejado de los minerales. En este caso hay desprendimiento de OH^- y el pH tiende a subir. Las ecuaciones 15 y 16 propuestas por Fox [4], para hidróxidos de hierro en oxisoles, ilustran este fenómeno. [3]



En el primer caso se origina OH^- y en el segundo H_2O y carga negativa libre. Este fenómeno explica el aumento de carga negativa cuando se fosfatan suelos. [4]

5.1.4.4. Reacciones de doble descomposición.

Estas reacciones involucran la formación de precipitados de fosfatos de hierro, aluminio y calcio en los cuales el producto de solubilidad juega un papel importante. [1,3]

5.1.4.5. Adsorción superficial.

La adsorción de fósforo sobre la superficie de los coloides del suelo (materia orgánica, arcillas, hidróxidos), ha sido evaluada utilizando las "isotermas de adsorción", que describen la adsorción de gases sobre superficies sólidas. [4]

Una de estas isotermas es la de Freundlich, cuya formula general es: $y = KC^{1/n}$; en donde "y" es el fósforo adsorbido por unidad de peso de suelo; "C" es la concentración de fósforo en la solución de equilibrio; y "K" y "n" son constantes empíricas de cada sistema. Esta ecuación es aplicable en un rango de concentración de fósforo en la solución de equilibrio, pero no permite el cálculo de la máxima capacidad de adsorción. [4]

La más utilizada de las isotermas es la de Langmuir, la cual establece que siempre que un gas esté en contacto con un sólido habrá un equilibrio establecido entre las moléculas en la fase de gas y las especies fijadas por adsorción correspondientes (las moléculas o los átomos) que están limitadas a la superficie del sólido. [1]

Como con todos los equilibrios químicos, la posición del equilibrio dependerá de un número de factores:

1. Las estabildades relativas de las especies involucradas en la adsorción y la fase gaseosa.
2. La temperatura del sistema (el gas y superficie, aunque ambos son normalmente iguales).
3. La presión del gas sobre la superficie.

En general, los factores (2) y (3) ejercen efectos opuestos en la concentración de la especie fijada por adsorción, es decir, que *la cobertura superficial* puede ser aumentada levantando la presión de gas pero será reducida si se levanta la temperatura superficial. [4]

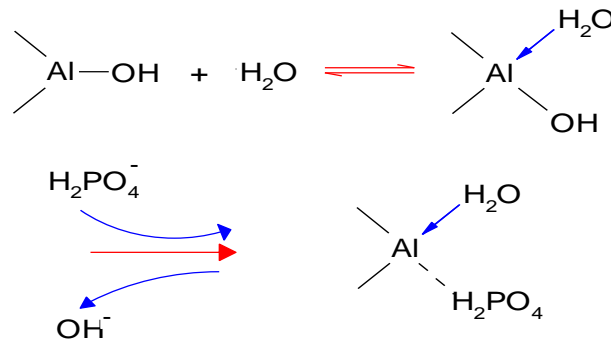
➤ Adsorción de fósforo por minerales arcillosos.

Los minerales arcillosos que entran en la composición de los suelos, adsorben el anión fosfato con mayor fuerza a un pH ácido. Existe una correlación directa entre la adsorción de fósforo y el contenido de arcilla del suelo, pero los distintos tipos de arcilla varían en la capacidad de adsorción de fosfatos. [2]

Entre las arcillas con mayor capacidad de adsorción está la caolinita (1:1) probablemente debido a su mayor contenido de grupos Al-OH expuestos en la superficie. La capa de alúmina está cubierta de tetraedros solo por un lado, y a pHs bajos puede crearse una capa superficial positiva al formarse grupos $\text{Al}(\text{OH})_2^+$. En arcillas tipo montmorillonita (2:1) como la bentonita, la capa de alúmina está bloqueada en ambos lados por tetraedros de Si-O, disminuyendo así la posibilidad de adsorción de aniones. ^[1,3]

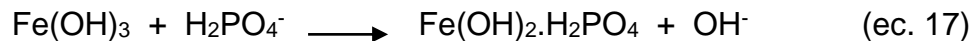
Las reacciones que se dan probablemente en una arcilla tipo caolinita, comprende la interacción de dos regiones OH del borde de la arista y una tercera se refiere a la oclusión superficial del fosfato en una zona amorfa de la superficie de la arcilla. La fase inicial en la fijación se cree que es la hidratación seguida de una sustitución de grupos Al-OH por fosfato de acuerdo a las reacciones que se muestran en el figura 2. ^[4]

Figura 2. Reacción de Adsorción de fósforo en minerales de arcilla 1:1.



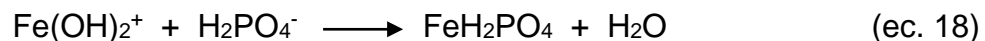
➤ **Adsorción de fósforo por compuestos de hierro y aluminio.**

Los fosfatos pueden ser adsorbidos por hidróxidos de Al y de Fe, mediante reacciones parcialmente reversibles que originan, en el caso de Fe, fosfatos hidróxidos férricos, como se muestra en la ecuación 17. ^[2]



El proceso de retención de fosfatos por óxidos de hierro, pueden ocurrir de varias maneras:

a. Retención química de fosfatos en las superficies protonadas $(\text{OH})_2^+$, como se muestra en la ecuación 18:

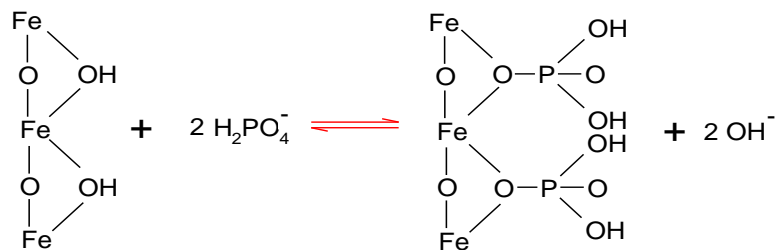


b. Retención química mediante sustitución de grupos OH de la superficie, como se muestra en la ecuación 19:



Estructuralmente la adsorción de fósforo sobre un mineral de óxidos de hierro, puede representarse como se muestra en el figura 3. [4]

Figura 3. Reacción de adsorción de fósforo sobre minerales de hierro.



Al aumentar la acidez se rompe la estructura de los minerales arcillosos y se liberan al medio, iones Al^{3+} y Fe^{3+} , procedentes de óxidos e hidróxidos coloidales aumentando su reactividad y facilitando su precipitación con fosfatos. [2]

➤ **Adsorción de fósforo por materiales amorfos tipo alófono.**

Los suelos derivados de cenizas volcánicas comprenden una apreciable área de los suelos de Suramérica y Centro América. La fracción arcilla de estos andisoles está constituida principalmente por Alófono. El material alófono es prácticamente una transición antes de cristalizar en arcillas definidas tales como caolinita y montmorillonita. En este periodo de transición tiene la propiedad de liberar gran cantidad de aluminio el cual afecta seriamente el crecimiento de las plantas y disminuye drásticamente la disponibilidad de fósforo en el suelo. [1,3]

El alófono confiere a los suelos una alta capacidad de retención de humedad y fijación de oxianiones como fosfatos y boratos. [4]

5.1.5. Isoterma de Langmuir.

Desarrollada por Irving Langmuir en 1916 para describir la dependencia de la cobertura superficial de un gas fijado por adsorción a la superficie y la presión del gas a una temperatura fija. Hay muchos otros tipos de isotermas (Temkin, Freundlich), las cuáles se diferencian en una o más de las asunciones hechas en

derivar la expresión para la cobertura superficial; en detalle, en cómo tratan la dependencia superficial de la cobertura de la entalpía de la adsorción. Mientras que la isoterma de Langmuir es una de las más simples, todavía proporciona una interpretación útil en la dependencia de la presión en el grado de la adsorción superficial. [4]

La cobertura superficial y las isotermas de adsorción, cuando se considera la de Langmuir, es convencional adoptar una definición de la cobertura superficial (θ) que define (saturación de la superficie). La cobertura superficial máxima de un adsorbato particular en una superficie dada siempre tiende a ser la unidad, es decir, $\theta_{\text{máximo}} = 1$. [4]

Esta manera de definir la cobertura superficial se diferencia de ésta adoptada generalmente en la ciencia superficial, donde la práctica más común es igualar θ con el cociente de la especie del adsorbato a los átomos superficiales del substrato (que conduce a la saturación, las coberturas que son casi invariables menores que la unidad). [3,4]

La isoterma de Langmuir se adapta bien a bajas concentraciones de fósforo en la solución de equilibrio (menores de 1mmol/L); permite calcular la constante relacionada con la energía de adsorción y la máxima capacidad de adsorción. En su forma lineal la ecuación 20 de Langmuir se expresa. [2,4]

$$\frac{C}{X} = \frac{1}{K \cdot b} + \frac{C}{b} \quad (\text{ec. 20})$$

En donde:

C = Concentración de fósforo en la solución de equilibrio.

X = Cantidad de fósforo adsorbido por unidad de peso de suelo.

K = Constante relacionada con la energía de adsorción.

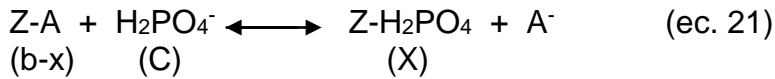
b = Máxima capacidad de adsorción.

1/b = pendiente de la línea.

1/K.b = Intercepto.

Esta ecuación puede ser deducida de la ley de acción de masas. El siguiente es un ejemplo tomado de Corey, en el que Z representa el complejo coloidal del suelo y A son los aniones adsorbidos al complejo coloidal. [3,4]

Se considera que $Z\text{-H}_2\text{PO}_4$ representa el fósforo adsorbido y equivale a X en la ecuación de Langmuir. Como la máxima capacidad de adsorción (b) esta representada no solo por X, si no también por Z-A, esta fase se puede sustituir por (b-X). La concentración de fósforo en la solución de equilibrio (C) se toma igual a la concentración de H_2PO_4^- , como se muestra en las ecuaciones 21 y 22. [2,3]



$$K = \frac{\text{A}^-}{\text{C}} \times \frac{\text{X}}{b - \text{X}} \quad (\text{ec. 22})$$

Al hacer las transposiciones necesarias para despejar C/X se obtiene la ecuación 23:

$$\frac{\text{C}}{\text{X}} = \frac{\text{A}^-}{Kb} + \frac{\text{C}}{b} \quad (\text{ec. 23})$$

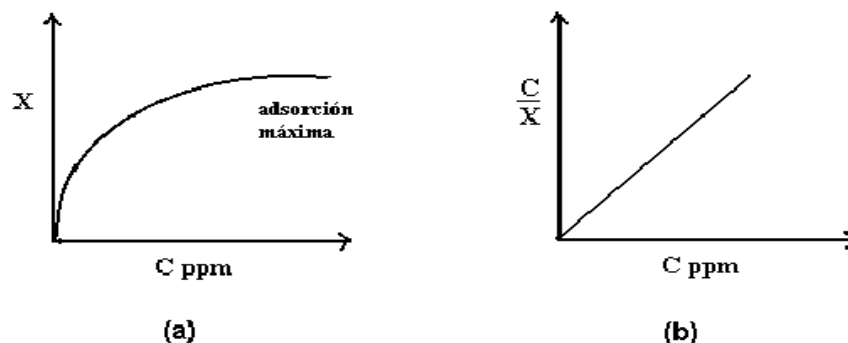
La cual es idéntica a la ecuación de Langmuir cuando A⁻ es constante. Esta ecuación indica que los fosfatos fijados sobre la superficie del coloide (Z), están compitiendo con los aniones (A⁻) por los sitios de intercambio. [2,4]

Para determinar la adsorción de fosfatos el suelo se pone en contacto con soluciones de fósforo de concentración conocida; se agitan hasta que se establezca el equilibrio para luego determinar el fósforo en el líquido sobrenadante (valor C de la ecuación).

El fósforo adsorbido se calcula como la diferencia entre la concentración antes y después del contacto con el suelo; con este resultado se calcula el fósforo adsorbido por gramo de suelo (Y en la ecuación). [1,4]

Al graficar la concentración de fósforo en la solución de equilibrio (C), contra el fósforo adsorbido (X), resulta una curva como la de la figura 4, (a), en la que se aprecia que hay una máxima capacidad de adsorción de fósforo cuando la curva se torna asintótica. [2,4]

Figura 4. Representación gráfica de la adsorción de fósforo



Si se grafica C/X contra C , se obtiene una línea recta figura 4 (b), que corresponde a la isoterma de Langmuir. Los valores de b y K de la ecuación, se hallan estadísticamente al igualar $C/X = Y$ y $C = X$, en la ecuación de la recta ($y = a + bx$).^[4]

Es necesario notar, que la adsorción es un fenómeno que aumenta a medida que transcurre el tiempo de contacto entre el suelo y la solución por lo tanto, los resultados obtenidos varían con el tiempo de agitación de la muestra. En este sentido Fassbender [49], al realizar experimentos de adsorción en suelos de Costa Rica, encontró variaciones considerables al repetir el ensayo a diferentes tiempos de agitación. Para lo cual se obtuvo que a mayor tiempo de agitación, aumenta la máxima capacidad de adsorción (b); hecho que se traduce a una menor pendiente ($1/b$) de la línea, teniendo en cuenta la ecuación 20.^[4]

Algunos suelos ácidos, con gran capacidad para reaccionar con fósforo, no alcanzan el equilibrio en muchos meses. En la práctica debe preferirse un equilibrio aparente de 48 o 72 horas y usar un tiempo patrón para efectos de poder comparar suelos.^[1,3]

Otro factor que debe tenerse en cuenta al hacer experimentos de adsorción de fosfatos, es la clase de sal utilizada, se recomienda utilizar el $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$ en una solución de CaCl_2 0.01 M, por las siguientes razones: 1) El calcio es el catión más abundante en la mayoría de los suelos agrícolas; 2) El pH al momento de equilibrio se aproxima a las condiciones de campo; 3) Se obtiene un líquido sobrenadante claro, lo cual facilita el trabajo en el laboratorio. Por otra parte, los fertilizantes fosfóricos más usados son los fosfatos de calcio.^[3]

5.1.6. Disponibilidad del fósforo para las plantas.

Es fósforo que se encuentra en el material madre es de baja asimilabilidad para las plantas. Probablemente todas las formas de fósforo sean asimilables luego de un largo período de tiempo. Si las plantas no toman los compuestos originales de fósforo, se hace necesario estudiar el comportamiento del mismo con relación a su asimilabilidad.^[1,4]

Las plantas absorben el fósforo de la solución del suelo, pero ésta tiene una concentración muy pequeña del nutriente como para satisfacer las necesidades de los vegetales durante el período de crecimiento. Por lo tanto el suelo debe ser capaz de hacer disponible una cantidad de fósforo varias veces mayor que la cantidad presente en la solución del suelo en un momento dado. Esto solamente es posible por la existencia de un equilibrio dinámico entre las diferentes formas de fósforo del suelo: (P insoluble, P lábil y P soluble).^[2]

Una vez removido el fósforo de la solución del suelo, el resultado será una transferencia de fosfatos desde la fase sólida del suelo. La relación entre fósforo en solución y fósforo fijado o lentamente soluble es un ejemplo del balance entre los factores capacidad e intensidad en la fertilidad del suelo. El factor intensidad es la cantidad de un nutriente disuelto en la solución del suelo. El factor capacidad es la cantidad del nutriente asociado con la matriz del suelo y en equilibrio con los iones del mismo nutriente en solución. [3,4]

En los suelos se pueden dar las siguientes combinaciones:

Alta capacidad y baja intensidad: se presenta en suelos ácidos o calcáreos ricos en fósforo, donde éste se precipita como fosfato de hierro, aluminio o calcio. [3]

Alta capacidad y alta intensidad: se presenta en suelos neutros con buen contenido de arcilla y materia orgánica, en donde el fósforo está adsorbido y es fácilmente intercambiable. [3] Baja capacidad y baja intensidad: es típica de los suelos ácidos o calcáreos que además tienen materiales originarios pobres en fósforo. [2]

Baja capacidad y alta intensidad: se puede dar en suelos arenosos muy fertilizados y con pocos coloides o compuestos de hierro, aluminio o calcio que fijan el fósforo en forma de fosfatos insolubles. [3]

5.1.6.1. Factores que afectan la disponibilidad de fósforo para las plantas.

➤ Humedad.

Las experiencias señalan que el movimiento del fósforo aumenta con el contenido de agua del suelo. Por otra parte la absorción de fósforo por las plantas aumenta cuando la permeabilidad del suelo disminuye, lo que concuerda con el concepto de que la transferencia del nutriente a las raíces se efectúa por medio del agua. [1,2]

➤ Textura.

Influye en la asimilabilidad del fósforo tanto por el contenido de agua que el suelo puede retener como por la contribución a la riqueza del fósforo del suelo. Los suelos de textura gruesa tienen menor contenido de agua que los de textura fina a cualquier permeabilidad, y por lo tanto menor difusión del fósforo hacia la raíz. Por otra parte la cantidad de fósforo lábil o intercambiable será menor en los suelos de textura gruesa que los de textura fina que tienen mayor capacidad de adsorción de aniones. [1,2]

➤ Coloide inorgánico.

Interesan el tipo y la cantidad de arcilla. Algunos minerales de arcilla son mucho más fijadores que otros. Generalmente aquellas arcillas que poseen gran capacidad de adsorción de aniones (debido a superficies cargadas positivamente), tienen una gran afinidad por los iones fosfato. Por ejemplo, una fijación

extremadamente alta es característica de las arcillas alófanas, que se encuentran típicamente en los Andisoles y otros suelos asociados con cenizas volcánicas. Los óxidos de hierro y aluminio, tales como la gibsita y la goetita, también pueden atraer y retener fuertemente los iones fósforo. Entre las arcillas silicatadas, la caolinita tiene la mayor capacidad de fijación de fósforo. Las arcillas de tipo 2:1 de los suelos menos meteorizados, tienen una relativamente pequeña capacidad de retener el fósforo. ^[1,2]

➤ **Materia orgánica.**

Es fuente permanente de fósforo a través de los procesos de descomposición y mineralización que liberan nutrientes a la solución del suelo. La materia orgánica generalmente tiene poca capacidad para fijar fuertemente los iones fosfato. Los suelos ricos en materia orgánica, especialmente de fracciones activas de la misma, casi siempre exhiben relativamente bajos niveles de fijación de fósforo. ^[1,2]

➤ **pH del suelo.**

La mayor parte de la fijación de fósforo ocurre a muy bajos o muy altos valores de pH. Cuando el pH sube desde menos de 5 hasta 6, los fosfatos de hierro y aluminio se hacen insolubles. Además cuando el pH cae desde más de 8 hasta menos de 6, los fosfatos de calcio incrementan su solubilidad. Por lo tanto, como regla general en los suelos minerales, la fijación de fosfatos es baja (y la disponibilidad para la planta es alta) cuando el pH se mantiene en el rango entre 6 y 7. Incluso en este rango de pH, la disponibilidad puede ser todavía muy baja, y los fosfatos solubles adicionados serán rápidamente fijados por el suelo. El bajo aprovechamiento por las plantas del fosfato agregado al suelo en una estación dada, es debido parcialmente a esta fijación. Un gran aprovechamiento deberá esperarse en los suelos orgánicos y en las mezclas preparadas de suelo, donde las concentraciones de calcio, hierro, y aluminio no son tan altas como en los suelos minerales. ^[1,2]

5.1.7.1. Abonos orgánicos.

Son productos de origen animal o vegetal que aplicados al medio de crecimiento o a las plantas, suministran elementos nutrientes. ^[36]

La utilización de abonos orgánicos ha despertado interés entre los agricultores, principalmente por los efectos negativos que ocasionan los productos químicos a la salud humana y el elevado costo de los insumos en nuestro país. ^[35]

Además, el abono orgánico es beneficioso desde el punto de vista químico, físico y biológico. Es necesario conservarlo, mediante adiciones periódicas de residuos de cosechas, abonos verdes incorporados químicos, compost artificialmente preparados, en condiciones controladas a partir de restos de tejidos vegetales y/o animales y adición de excretas de animales bien compostadas. 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. [36]

➤ **Fertilizantes o abonos organico-minerales.**

Producto Sólido obtenido por mezcla o combinación de abonos minerales y orgánicos de origen animal y/o vegetal y/o pegenético y / o provenientes de lodos de tratamiento de aguas residuales o residuos sólidos urbanos no separados en la fuente, que contiene porcentajes mínimos de materia orgánica expresada como carbono orgánico y de los elementos que se indican. [35,36]

➤ **Enmienda orgánica húmica.**

Producto Orgánico sólido de origen pedogenético con o sin tratamiento químico que aplicado al suelo aporta o genera humus mejorando las propiedades físicas, químicas y biológicas del mismo y que cumple las especificaciones que se indican. [35,36]

➤ **Enmienda orgánica no húmica.**

Producto orgánico sólido obtenido a partir de la deshidratación y estabilización de los residuos provenientes de las plantas industriales y de tratamiento de aguas residuales:a) industriales b) urbanos c) residuos sólidos urbanos no separados en la fuente. [35,36]

5.1.8. Importancia de los abonos orgánicos.

La necesidad de disminuir la dependencia de productos químicos sintéticos en los distintos cultivos, está obligando a la búsqueda de alternativas fiables y sostenibles. En la agricultura ecológica, se le da gran importancia a este tipo de abonos, y cada vez más, se están utilizando en cultivos intensivos. No se puede olvidar la importancia que tiene mejorar diversas características físicas, químicas y biológicas del suelo y en este sentido, este tipo de abonos juega un papel fundamental. [35]. Con estos abonos, se aumenta la capacidad que posee el suelo de absorber los distintos elementos nutritivos, los cuales se aportan posteriormente con los abonos minerales o inorgánicos. [36]

Actualmente, se están buscando nuevos productos en la agricultura, que sean totalmente naturales. Existen incluso empresas que están buscando en distintos ecosistemas naturales de todas las partes del mundo, sobre todo tropicales, distintas plantas, extractos de algas, etc., que desarrollan en las diferentes plantas, distintos sistemas que les permiten crecer y protegerse de enfermedades y plagas. [35]

De esta forma, en distintas fábricas y en entornos totalmente naturales, se reproducen aquellas plantas que se ven más interesantes mediante técnicas de biotecnología. [36] En estos centros se producen distintas sustancias vegetales,

para producir abonos orgánicos y sustancias naturales, que se están aplicando en la nueva agricultura. ^[35].

5.1.8.1. Propiedades de los abonos orgánicos.

Los abonos orgánicos tienen unas propiedades, que ejercen unos determinados efectos sobre el suelo, que hacen aumentar la fertilidad de este. Básicamente, actúan en el suelo sobre tres tipos de propiedades. ^[35]

➤ **Propiedades físicas.**

El abono orgánico por su color oscuro, absorbe más las radiaciones solares, con lo que el suelo adquiere más temperatura y se pueden absorber con mayor facilidad los nutrientes. El abono orgánico mejora la estructura y textura del suelo, haciendo más ligeros a los suelos arcillosos y más compactos a los arenosos. Mejoran la permeabilidad del suelo, ya que influyen en el drenaje y aireación de éste. Disminuyen la erosión del suelo, tanto de agua como de viento.

Aumentan la retención de agua en el suelo, por lo que se absorbe más el agua cuando llueve o se riega, y retienen durante mucho tiempo, el agua en el suelo durante el verano. ^[35]

➤ **Propiedades químicas.**

Los abonos orgánicos aumentan el poder tampón del suelo, y en consecuencia reducen las oscilaciones de su valor de pH. Aumentan también la capacidad de intercambio catiónico del suelo, con lo que aumentamos la fertilidad disminuyendo la capacidad de adsorción de P. ^[36]

➤ **Propiedades biológicas.**

Los abonos orgánicos favorecen la aireación y oxigenación del suelo, por lo que hay mayor actividad radicular y mayor actividad de los microorganismos aerobios. Los abonos orgánicos constituyen una fuente de energía para los microorganismos, por lo que se multiplican rápidamente. ^[36]

5.1.9. Gallinaza.

La producción avícola intensiva, genera desperdicios con alto contenido de nutrientes y material orgánico, que causan la contaminación de suelos y aguas, emiten olores desagradables y altas concentraciones de gases, además de propiciar la proliferación de vectores y microorganismos patógenos; todo ello con un impacto negativo en el ambiente. Dentro de los diferentes sistemas de producción avícola, se debe contemplar un plan de manejo adecuado de los desechos, para que en vez de generar contaminación ambiental, se conviertan en una fuente de ingresos, que permita a los productores avícolas contemplar la posibilidad de buscar alternativas económicas para el uso y manejo eficiente de la gallinaza. ^[36,43]

5.1.9.1. Gallinaza: residuo orgánico.

La gallinaza se utiliza tradicionalmente como abono, su composición depende principalmente de la dieta y del sistema de alojamiento de las aves. La gallinaza obtenida de explotaciones en piso, se compone de una mezcla de deyecciones y de un material absorbente que puede ser viruta, pasto seco, cascarillas, entre otros y este material se conoce con el nombre de cama; esta mezcla permanece en el galpón durante todo el ciclo productivo. La gallinaza obtenida de las explotaciones de jaula, resulta de las deyecciones, plumas, residuo de alimento y huevos rotos, que caen al piso y se mezclan. Este tipo de gallinaza tiene un alto contenido de humedad y altos niveles de nitrógeno, que se volatiliza rápidamente, creando malos y fuertes olores, perdiendo calidad como fertilizante. Para solucionar este problema es necesario someter la gallinaza a secado, que además facilita su manejo. Al ser deshidratada, se produce un proceso de fermentación aeróbica que genera nitrógeno orgánico, siendo mucho más estable. [38]

5.1.9.2. Calidad de la gallinaza.

La calidad de la gallinaza está determinada principalmente por: el tipo de alimento, la edad del ave, la cantidad de alimento desperdiciado, la cantidad de plumas, la temperatura ambiente y la ventilación del galpón. También son muy importantes el tiempo de permanencia en el galpón -una conservación prolongada en el gallinero, con desprendimiento abundante de olores amoniacales, reduce considerablemente su contenido de nitrógeno y, finalmente, el tratamiento que se le haya dado a la gallinaza durante el secado. [37,38]

5.1.9.3. Producción de gallinaza.

La cantidad de gallinaza depende de diversos factores, como se describe a continuación. [36]

Edad del ave: las aves jóvenes producen menos excretas, debido a su bajo consumo de alimento en sus primeras etapas de vida. [36]

Línea: en pollos de engorde la situación es compleja debido a que la cantidad de gallinaza producida es una mezcla de deyecciones y del material utilizado como cama. [36]

Desde el punto de vista puramente teórico, hay que tener en cuenta que por cada kilo de alimento consumido los pollos producen alrededor de 1.1 a 1.2 kg de deyecciones frescas, con el 70 .80% de humedad. En deyecciones totalmente secas ello supondría unos 0.2. 0.3 kg por ave y por kilo de alimento consumido. [36]

La cantidad de material utilizado como cama, en el caso de la viruta, varía entre 5 a 8 kg de cama/m² de superficie del galpón, lo que a una densidad de 15 pollos /m², supone de 0.3 . 0.5 kg/pollo. La producción de gallinaza pura y seca, al final del periodo, depende del peso vivo y de su consumo total, pudiéndose estimar entre 20 y 28 kg/ave. [38]

La cantidad de gallinaza, junto con la viruta, que puede recogerse al final de la cría en un galpón de pollos, depende de la cantidad de cama de viruta de la humedad del producto final, estimándose que puede variar entre 1.5 y 2 kg por pollo, con una humedad entre 20 .30%. Con respecto a la producción de gallinaza de ponedoras, la situación parecería más sencilla al recogerse en forma pura (explotaciones en jaula). [37]

Sin embargo, la circunstancia de existir diversos sistemas de recogida de deyecciones (en función de su periodicidad y/o si se dispone de un presecado o no), hace que la humedad (70 a 80%) de éstas varíe considerablemente, lo que afecta a su producción aparente 1 a 4,6. [37,38]

Lo más lógico sería expresar la producción de gallinaza de las ponedoras en materia seca y en relación al consumo de alimento (Tabla 1).

Consumo de alimento: la producción de heces por parte de las aves depende de la cantidad de alimento consumido; así, para el pollo de engorde la relación alimento: deyecciones es de 1:1.1 a 1.2, con una humedad entre el 70 al 80% y una relación de 1:1 en ponedoras. Lo anterior es teniendo en cuenta la digestibilidad del alimento del 70 al 80%, o los mismos valores en humedad 1 a 4,5. [38]

Los diferentes niveles de humedad, en función a su momento de recolección.

Tabla 1. Estimación de la producción de deyecciones de las ponedoras

Tipo de gallina	Consumo de alimento gr/ave/día	Digestibilidad del alimento, %	Materia Seca deyecciones gr/ave/día
Liviana	100 – 110	75 – 80	20 – 27
Semi pesada	110 – 120	75 – 80	22 – 30

5.1.10. Materia orgánica.

La MO estable obtenida en el proceso de compostaje está formada por sustancias similares a las húmicas y por sustancias no húmicas como se muestra en la Figura 5. [36]

Figura 5. Composición Química de la Materia Orgánica de un Compost.



➤ **Las sustancias no húmicas.**

Son moléculas orgánicas que han sido parcialmente descompuestas por reacciones de hidrólisis y que son susceptibles de seguirse transformando hasta mineralización completa o que pueden sufrir procesos de polimerización para transformarse en SH. [36]

➤ **Las sustancias similares a las húmicas.**

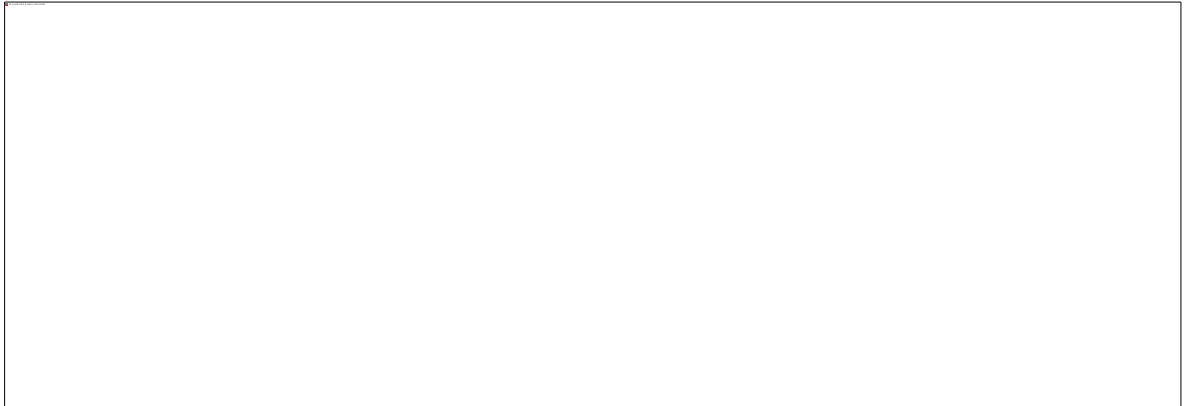
Los restos vegetales están constituidos fundamentalmente por sustancias aromáticas cuyos representantes más genuinos son la lignina y los taninos; y por compuestos alifáticos representados principalmente por celulosa y proteínas [35].

Sobre ellos actúa la microflora del suelo que realiza su destrucción y posterior polimerización y condensación para generar las SH. Todo este complejo proceso es el que se conoce como humificación [36].

La celulosa y la lignina son atacadas por hongos y actinomicetos, mientras que las proteínas son transformadas por las bacterias con liberación de nitrógeno

inorgánico, que permite el crecimiento fúngico y hace posible la continuidad del proceso de transformación. Las sustancias aromáticas culminan su transformación con la formación de ácidos polifenólicos sencillos, derivados del fenilpropano producido en la rotura de la lignina preferentemente, que son considerados como precursores húmicos. Del mismo modo la celulosa termina dando azúcares sencillos y las proteínas, aminoácidos como se muestra en la figura 6. [36]

Figura 6. Formación de los Precursores Húmicos.



Los aminoácidos son utilizados por las bacterias en la construcción de sus propias proteínas, mientras que los azúcares se consumen como combustible para la obtención de energía por todos los microorganismos edáficos. Este mecanismo hace que el nitrógeno se conserve en su mayor parte, pasando de forma orgánica a inorgánica y viceversa, mientras que el carbono es consumido y transformado en dióxido de carbono pasando a la atmósfera libre. Todo ello conduce a que la relación C/N inicial de los restos vegetales vaya disminuyendo a medida que se avanza hacia la formación de SH. Esta disminución viene favorecida por la posibilidad de algunas bacterias, algas y hongos de fijar nitrógeno atmosférico, que compensa y a veces con creces, las pérdidas de nitrógeno inorgánico que se producen por lavado o por desnitrificación. [35,36]

Los microorganismos excretan nitrógeno en forma amoniacal y algunos ácidos alcohólicos sencillos procedentes de sus cadenas respiratorias, estos últimos con un fuerte poder complejante. Algo similar sucede cuando mueren. Puede ocurrir que la oxidación del producto bacteriano sea incompleta y los azúcares se caramelizan y forman sustancias parecidas a las melaninas, de naturaleza cíclica, que engrosan el grupo aromático de los precursores húmicos. También se producen condensaciones entre los aminoácidos y los ácidos alcohólicos para generar cadenas alifáticas que constituirán los terminales activos de las SH como se muestra en la figura 7. [36]

Figura 7. Proceso de formación de las Sustancias Húmicas.



Según la recomendación de la Soil Science Society of América, la MO se define en los siguientes términos: “La fracción orgánica del suelo incluye residuos vegetales y animales en diferentes grados de descomposición, tejidos y células de organismos que viven en el suelo”. La parte mas estable de la MO se llama humus, que se puede definir como “la fracción mas o menos estable de la MO que se obtiene después que se ha descompuesto la mayor parte de las sustancias vegetales o animales”. [35]

Las SH están compuestas por los AH, AF y huminas, sustancias amorfas de colores oscuros, polímeros tridimensionales de elevado peso molecular, de carácter ácido, constituido 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 MO: hidroxilo, amino, metoxi....) y cadenas alifáticas. [36]

La fertilidad de un suelo orgánico se ha relacionado con el contenido de humus, y esto se debe a las acciones que este material ejerce sobre sus propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo. [36]

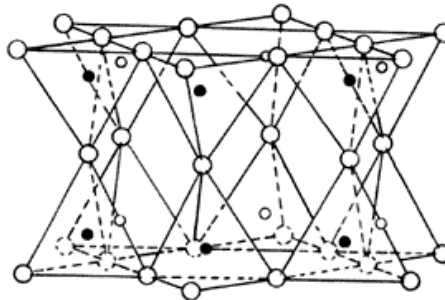
5.1.10.1. Efectos Químicos.

La no presencia de MO en el suelo conduce a un deterioro de sus propiedades físico-químicas, mayor erosionabilidad, con la consiguiente pérdida de productividad a medio y largo plazo. Por lo tanto, la aplicación de MO en el suelo

está sobradamente justificada. Entre los efectos indirectos de las SH sobre la planta hay que incluir los efectos que provoca ésta en el suelo. ^[35,36]

- Aporte de nutrientes minerales a las raíces.
- Las SH participan en muchas reacciones, la mayoría de las cuáles son consecuencia de sus propiedades coloidales. Tienen grandes áreas superficiales y capacidades de absorción mayores que los de los minerales de la arcilla. De la figura 8.

Figura 8. Lámina de arcilla



- Los materiales húmicos participan en el atrapamiento y transporte de iones metálicos, por esta razón mejoran la CIC del suelo, propiedad que consiste en absorber los nutrientes catiónicos del suelo (H^+ , K^+ , NH_4^+ , Ca^{2+} , Mn^{2+} , Al^{3+} , Fe^{2+} , Fe^{3+}), poniéndolos más tarde a disposición de las plantas.
- Aumento de la capacidad tampón del suelo a nivel de pH.
- Formación de complejos estables con cationes polivalentes como (Cu^{2+} , Mn^{2+} , Zn^{2+} , Fe^{3+} entre otros) y aumento así de la disponibilidad de micronutrientes para las plantas.
- Aporte de SH que actúan como transportadores de nutrientes.
- Afectar a la bioactividad, persistencia y biodegradabilidad de plaguicidas por combinarse con ellos.

Pero se debe tener en cuenta que para conseguir estas propiedades se debe aportar grandes cantidades de MO y de buena calidad. De otro lado las SH ejercen efectos fisiológicos sobre las plantas. La evidencia de efectos positivos puede resumirse en estimulación general en producción de biomasa. Esto implica que la planta absorbe dichas sustancias. Los AH se desplazan a la parte aérea en

menor cantidad que los fúlvicos siendo estos últimos los que la planta absorbe mejor. [36]

Las SH ejercen un efecto favorable sobre la toma y contenido de nutrientes. Para algunos elementos como el Cloro (Cl), la adición de SH tiene efectos inhibidores por lo que puede contrarrestar los síntomas de salinidad. Pueden influir directamente en la toma de micronutrientes debido a su capacidad de formar complejos con determinados cationes del Hierro (Fe), Manganeseo (Mn), Zinc (Zn), etc. Aumentan la solubilidad del hierro en la disolución del suelo y mejoran su translocación en el interior de la planta. Ya sea mediante aplicación al suelo o foliar, aumentan el crecimiento radicular y la formación de raíces secundarias, así como en el número de hojas y flores. [19]

Se han sugerido efectos sobre la permeabilidad de la membrana para explicar el papel de los compuestos húmicos en una mejor nutrición de las plantas, con base en su comportamiento parecido a un surfactante, que estimula la absorción de iones en los tejidos de la raíz. [19]

5.1.10.2. Efectos Físicos.

Las SH contribuyen a la estructura del suelo, haciendo más ligeros a los suelos arcillosos y más compactos a los arenosos, por cuantas estas sustancias 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. Mejoran la permeabilidad del suelo, ya que influyen en el drenaje y aireación de éste, disminuyendo la erosión, provocada tanto por el agua como el viento, así como un aumento de retención de agua en el suelo, por lo que se absorbe más el agua cuando llueve o se riega, y se retiene durante mucho tiempo en el suelo durante el verano. [36]

Los AH, a través del humus, mejoran la capacidad de retención de agua de los suelos, como resultado de la floculación y agregación de 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. [36]

Por otra parte, el color oscuro presente en las SH ejerce un determinado efecto sobre el suelo, por cuanto esta tonalidad hace que se presente más absorción de rayos infrarrojos presentes en las radiaciones solares, con lo que el suelo adquiere más temperatura y se pueden absorber con mayor facilidad los nutrientes.

Finalmente podría decirse que las SH favorecen la aireación y oxigenación del suelo, por lo que hay mayor actividad radicular y mayor actividad de los

microorganismos aerobios, además de ser una fuente de energía para los microorganismos, por lo que se multiplican rápidamente. ^[36]

5.1.10.3. Efectos Biológicos.

La actividad microbiana del suelo se ve estimulada y favorecida por los aportes de las SH, que le sirve de nutrientes y se multiplican más activamente cuanto mejor provisto esté el suelo de humus, puesto que es una importante fuente de carbohidratos para los microorganismos del suelo. También favorecen el desarrollo normal de cadenas tróficas en el suelo. Además las SH estimulan la permeabilidad de la membrana celular, la formación de raíces y la germinación de semillas. ^[35]

5.1.10.4. Ácidos Húmicos.

Los AH se definen como el producto de un proceso oxidativo continuado de MO del suelo en presencia de minerales como el calcio, potasio, fósforo y micronutrientes. El material resultante está enriquecido por estos elementos más el nitrógeno fijado del aire. ^[35]

La mayoría de los autores señalan que el contenido de aminoácidos de los AH de distintos suelos, es en general homogéneo, aunque la capacidad de hidrolizar el nitrógeno en los diferentes AH es distinta. La situación del nitrógeno en las moléculas de las SH es muy importante, ya que determina en cierta medida la accesibilidad de éste a los microorganismos. ^[35]

Los AH corresponden a la última fase de la transformación de la MO. Todas las demás sustancias que se van generando en el proceso de transformación se podrían llamar "MO sólida o líquida" pero no son AH. Químicamente los AH son muy complejos, formados por polímeros, compuestos aromáticos, estructuras alifáticas entre otras. Su peso molecular es muy elevado, tienen una acción más lenta y duradera, presentan una estructura estable y muestran alta CIC. ^[36]

Los AH constituyen la parte más cualificada de la MO, aplicados al suelo mejoran las características físicas, químicas y biológicas de éste, a la vez que equilibran la solución nutritiva. Actúan sobre los compuestos minerales desbloqueando los elementos que los componen; fijan los nutrientes aportados con los abonos disminuyendo las pérdidas por lixiviación. Favorecen el desarrollo del sistema radicular. Aumentan la permeabilidad celular, con lo que facilitan la absorción de nutrientes. Normalmente se aplican en fertirrigación, e incluso por vía foliar en mezcla con productos fitosanitarios. Son también aptos mezclados con los quelatos correspondientes para su uso en el control de deficiencias. ^[36]

A pesar de la diversidad de los AH de distintos suelos, turbas, restos vegetales en descomposición, conservan unos principios de estructura muy semejantes. Estos presentan una naturaleza muy particular, muy distinta a la de cualquier sustancia vegetal. Sobre la naturaleza aromática de los AH de suelos y turbas hablan los datos obtenidos con ayuda de espectroscopía infrarroja. [35]

Los grupos funcionales característicos de los AH son los carboxilos e hidroxilos fenólicos, cuyo hidrógeno es susceptible a las reacciones de sustitución. Por la presencia de estos grupos se determinan las propiedades ácidas y la capacidad de cambio de los AH. Para determinar la cantidad de estos grupos funcionales, habrá que considerar la naturaleza de dichos ácidos, así como los métodos empleados en su determinación. [36]

Actualmente se sabe que los AH son compuestos poliméricos, y que por tanto están constituidos por monómeros, que a su vez están formados por otras unidades estructurales. Entre las unidades citadas, destacan los compuestos aromáticos de tipo fenólicos y nitrogenados, tanto cíclicos (indol, pirimidina, purinas y otros), como aminoácidos alifáticos. [36]

En cuanto a la polémica referente a la estructura amorfa o cristalina de los AH, actualmente ya no existen dudas, ya que se ha demostrado convincentemente la estructura amorfa de dichos ácidos. [35]

5.1.10.5. Ácidos Fúlvicos.

Al igual que los AH los AF, son el producto de la transformación de la MO del suelo y corresponden a la última fase de la transformación de la MO. Constituyen una serie de compuestos sólidos o semisólidos, amorfos de color amarillento y naturaleza coloidal, fácilmente dispersables en agua y no precipitables por los ácidos, susceptibles en cambio de experimentar floculación en determinadas condiciones de pH y concentración de soluciones de cationes no alcalinos. [36]

Los AF están constituidos sobre todo por polisacáridos, aminoácidos, compuestos fenólicos, etc. Presentan un alto contenido en grupos carboxílicos y su peso molecular es relativamente bajo, presentan una menor CIC, acción más rápida y menos duradera, menor estabilidad estructural y por tanto mayor biodegradabilidad en contraste con los AH. [36]

Con su estructura simple y su pequeño tamaño (2 Å) entran fácilmente en los intersticios de la red cristalina de las arcillas, movilizándolo hierro y aluminio los cuáles se vuelven solubles. Movilizan igualmente el calcio y el magnesio con los cuáles se ligan. Los fulvatos formados, son muy móviles y completamente hidrosolubles, por lo que percolan con facilidad en el suelo, lo lixivian donde aparecen. Por otro lado se acumula humus ácido en todos los suelos que carecen

de una microvida adecuada y donde por la misma razón, no se favorece la formación del humus. [36]

5.1.10.6. Huminas.

Las húminas son ácidos orgánicos que se han fijado en las arcillas por intermedio de puentes catiónicos, o precipitados después de una degradación microbiológica o química. La fracción de humina puede alcanzar en algunos suelos el 80% del carbono total. [36]

Las huminas presentan la característica principal de ser la parte del humus insoluble en álcalis y ácidos minerales. Al ser insoluble es relativamente inerte y está constituida por AH y por sustancias húmicas altamente condensadas tan íntimamente unida a la parte mineral del suelo que no puede separarse. [36]

Los AH extraídos de huminas tienen un porcentaje de carbono algo menor, y mayor el de oxígeno e Hidrógeno (H), en comparación con los AH extraídos del suelo descalcificado; poseen también menor capacidad de absorción. Probablemente los AH extraídos de huminas son por su naturaleza menos complejos. [36]

5.1.11. Evaluación del índice de humificación.

Índices basados en el fraccionamiento de la MO. Los Índices de humificación son: $H_{R1} = \% \text{CAH} / \% \text{CFF}$; $H_{R2} = \% \text{CAH} / \% \text{CAF}$ (AH, FF, AF son cantidades de carbono de los AH, FF y en los AF respectivamente). En los procesos de compostaje estos índices aumentan, reflejando la formación de especies estructuralmente más complejas. [36]

5.1.12. Acido cítrico.

El ácido cítrico es un ácido orgánico tricarbóxico que está presente en la mayoría de las frutas, sobre todo en cítricos como el limón y la naranja. Su fórmula química es $\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7$. Es un buen conservante y antioxidante natural que se añade industrialmente como aditivo en el envasado de muchos alimentos como las conservas de vegetales enlatadas. En bioquímica aparece como un metabolito intermediario en el ciclo de los ácidos tricarbóxicos, proceso realizado por la mayoría de los seres vivos. [39]

5.1.12.1. Obtención del ácido cítrico.

El ácido cítrico es obtenido principalmente en la industria gracias a la fermentación de azúcares como la sacarosa o la glucosa, realizada por un microorganismo (hongo) llamado *Aspergillus niger*. El proceso de obtención tiene varias fases como la preparación del sustrato de melaza, la fermentación aeróbica de la sacarosa por

el aspergillus, la separación del ácido cítrico del sustrato por precipitación al añadir hidróxido de calcio o cal apagada para formar citrato de calcio. Después se añade ácido sulfúrico para descomponer el citrato de calcio. La eliminación de impurezas se realiza con carbón activado o resinas de intercambio iónico, se continúa con la cristalización del ácido cítrico, el secado o deshidratación y el empaquetado del producto. [39]

5.1.12.2. Ciclo de Krebs.

El ciclo de Krebs (también llamado ciclo del ácido cítrico o ciclo de los ácidos tricarbónicos) es una ruta metabólica, es decir, una sucesión de reacciones químicas, que forma parte de la respiración celular en todas las células aeróbicas. En organismos aeróbicos, el ciclo de Krebs es parte de la vía catabólica que realiza la oxidación de glúcidos, ácidos grasos y aminoácidos hasta producir CO₂, liberando energía en forma utilizable (poder reductor y GTP) [39]

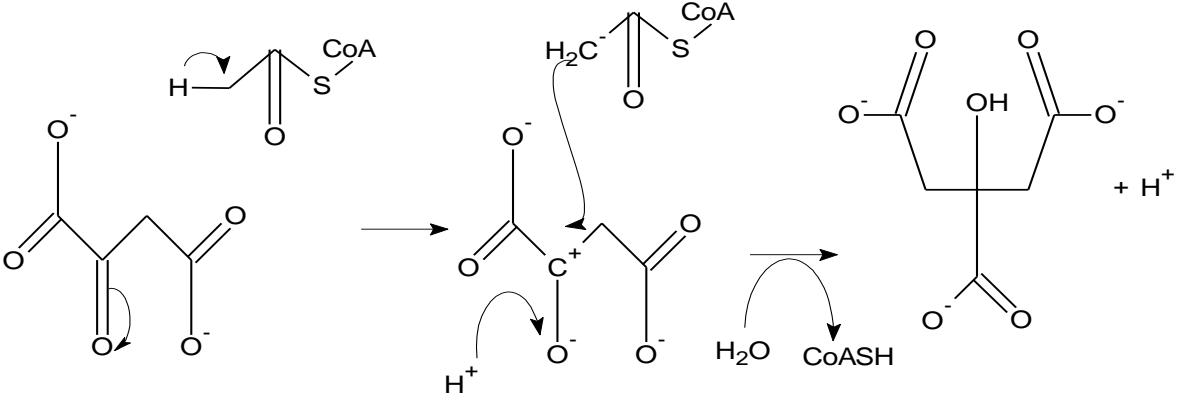
El metabolismo oxidativo de glúcidos, grasas y proteínas frecuentemente se divide en tres etapas, de las cuales, el ciclo de Krebs supone la segunda. En la primera etapa, los carbonos de estas macromoléculas dan lugar a moléculas de acetil-CoA de dos carbonos, e incluye las vías catabólicas de aminoácidos (p. ej. desaminación oxidativa), la beta oxidación de ácidos grasos y la glucólisis. La tercera etapa es la fosforilación oxidativa, en la cual el poder reductor (NADH y FADH₂) generado se emplea para la síntesis de ATP según la teoría del acoplamiento quimiosmótico. El ciclo de Krebs también proporciona precursores para muchas biomoléculas, como ciertos aminoácidos. Por ello se considera una vía anfibólica, es decir, catabólica y anabólica al mismo tiempo. [39]

5.1.12.3. Formación del ácido cítrico.

La enzima citrato sintasa es condensante, pues lleva a cabo una condensación aldólica entre el metilo del Ac-CoA y el carbonilo del oxaloacetato, en la reacción se hidroliza el tioéster y se forma el CoA-SH (succinil-CoA). Esta enzima también cataliza la formación del monofluorocitrato a partir de monofluoro-Ac-CoA. Esta reacción es letal, pues el fluoroacetato no es tóxico, pero el fluorocitrato es inhibidor de la aconitasa, siguiente enzima del ciclo. La citrato sintasa es inhibida por succinil-CoA, ATP, NADPH, ésteres de CoA y ácidos grasos de cadena larga (18C), no se sabe si esto último tiene significado biológico. [40]

La reacción de la citrato sintasa se divide en tres pasos, los dos primeros son concertados: 1.- formación del anión tienolato; 2.- formación del S-citril-CoA (una molécula quiral) y 3.- formación de citrato y liberación de CoASH. [40]

Figura 9. Condensación de Acetil CoA en oxaloacetato por acción de citrato sintetaza. [40]



6. METODOLOGÍA.

6.1. UBICACIÓN GEOGRÁFICA.

Las muestras de gallinaza a estudiar fueron obtenidas en almacenes agropecuarios del Barrio Bolívar, Municipio de Popayán, Departamento del Cauca

El estudio se realiza en el Laboratorio de Agroquímica de la Universidad del Cauca.

6.2 TOMA DE MUESTRAS.

Para tomar las muestras de gallinaza, se hizo un recorrido por los diferentes almacenes agropecuarios, adquiriendo submuestras en cada almacén mezclando homogéneamente para formar una muestra compuesta de 1Kg

6.3. EVALUACIÓN DE LA GALLINAZA DE ACUERDO A LA NORMA ICONTEC 5167/03

Con el objeto de analizar la gallinaza, se aplica la metodología requerida por la NORMA TÉCNICA COLOMBIANA " MATERIALES ORGÁNICOS UTILIZADOS COMO FERTILIZANTES O ACONDICIONADORES DE SUELOS "5167/03 que ha sido previamente estandarizada en el laboratorio de Agroquímica de la Universidad del Cauca .Los análisis comprenden las siguientes determinaciones:

6.3.1. Determinación de humedad: se determina por diferencia de peso después de haber calentado durante 24 horas una cantidad determinada de gallinaza a 105°C. ^[41]

6.3.2. Pérdidas por Volatilización y Cenizas (%): Se determinan por diferencia de peso de una cantidad determinada de gallinaza molida y tamizado después de calentar a 400 °C durante 4 horas. ^[41]

6.3.3. Determinación de la densidad: El método se basa en la determinación de la masa por volumen de un material luego de que se ha depositado libremente en un recipiente de volumen conocido. Para ello, se determina el volumen que ocupa una cantidad determinada de gallinaza seca y tamizada por malla 30. ^[41]

6.3.4. Determinación del % saturación de agua: Se considera como porcentaje de saturación el volumen de agua necesario para saturar 100 g de material orgánico secado al aire. Para ello, se toman una cantidad determinada del material que se utilizó para la determinación de densidad y se le va adicionando poco a poco volúmenes de agua medidos en una probeta, se agita continuamente con la espátula de madera, esto con el fin de eliminar aire y formar poco a poco una

masa. Se adiciona agua hasta llegar a un punto de equilibrio donde no absorba más agua y no la escurra. Se registra el volumen de agua utilizado. ^[41]

6.3.5. Determinación de la conductividad eléctrica: Para la determinación de conductividad eléctrica es necesario preparar una pasta de saturación con el mismo material de ensayo con el que se realizaron las determinaciones de densidad. Se deja la pasta saturada en reposo de un día para otro, con el fin de permitir la adecuada solubilización de las sales presentes en el material. Se filtra al vacío y se mide la conductividad eléctrica en el filtrado. ^[42]

6.3.6. Determinación del pH: Se realiza potenciométricamente en pasta saturada con el mismo material de ensayo con el que se realizan las determinaciones de densidad. ^[42]

6.3.7. Determinación del contenido de carbón Orgánico total: Se determinará por el método colorimétrico a 585nm

Se toman 0,1 g de gallinaza seca y tamizada por malla 10. Se adicionan 5 mL de dicromato de potasio 1 N y 10 mL de ácido sulfúrico concentrado (98 – 99 % de Pureza). Se agita durante 1 min y posteriormente se deja en reposo durante 30 min. Seguidamente se adiciona 135 mL de agua destilada, se agita vigorosamente y se deja decantar durante 12 horas. Se toma del sobrenadante una alícuota para medir la absorbancia a una longitud de onda de 585 nm. El contenido de carbono orgánico (% C_{org}) en la muestra se obtiene al interpolar el valor de la absorbancia en la curva de calibración.

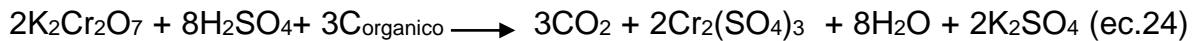
Preparación de la Curva de Calibración:

A partir de una solución patrón de sacarosa al 5 % (2.1%C) se preparan las siguientes soluciones patrón en balones aforados de 25 mL, empleando para cada concentración los volúmenes de solución patrón de sacarosa especificados en la tabla 2.

Tabla 2: Preparación de la curva de calibración de sacarosa.

NIVEL DE CONCENTRACIÓN	Volumen de Solución patrón (mL)	Concentración (mg C/mL Solución)	mg C
1	0,5	0,42	0,84
2	1,0	0,84	1,68
3	2,0	1,68	3,36
4	2,5	2,10	4,20
5	3,75	3,15	6,30
6	5,0	4,20	8,40

Se toma una alícuota de 2 mL de cada una de las soluciones de la curva de calibración se agrega 5 mL de dicromato de potasio 1 N y 10 mL de ácido sulfúrico concentrado, se agite por 1 min y se deja decantar durante 12 horas. Al día siguiente se toma una alícuota de los sobrenadantes y se mide la absorbancia a 585 nm. Con los resultados obtenidos se realiza una grafica relacionando los miligramos de carbono de cada solución (tabla 2) respecto a los valores de absorbancia correspondientes a cada nivel de concentración. [42]



6.3.8. Determinación del contenido de nitrógeno: se determina por el método de Kjeldhal: Este método es el utilizado universalmente para la determinación cuantitativa de nitrógeno procedente de diversos materiales, y se basa en tres etapas: Oxidación de la muestra, descomposición del sulfato ácido de amonio, titulación de borato de amonio. [42]

Oxidación de la Muestra. La muestra de suelo se trata con ácido sulfúrico y catalizadores con el propósito de oxidar la materia orgánica y convertir el nitrógeno en sulfato ácido de amonio según la siguiente reacción. [40]



El sulfato ácido de amonio se descompone por medio de un exceso de álcali para liberar el amoniaco el cual se recoge por destilación sobre ácido bórico. Las reacciones son. [40]



El borato de amonio formado en el paso anterior se valora con HCl ó H₂SO₄ usando como indicadores de punto final una mezcla de rojo de metilo y azul de metileno ó de rojo de metilo y verde de bromocresol. La reacción correspondiente es. [40]



6.3.9. Determinación del contenido total de Potasio Calcio, Magnesio y Sodio: se determinan mediante espectrofotometría de Absorción atómica en el equipo Thermo serie S4SN71203 de la unidad de análisis industriales de la Universidad del Cauca, en un extracto obtenido mediante digestión ácida con una mezcla regia preparada con HClO₄: HNO₃ en relación 3:1. [42]

6.3.10. Determinación del contenido total de micronutrientes: Cu, Mn, Fe, Zn: se determinan mediante espectrofotometría de Absorción atómica la cuantificación se realizó por espectrofotometría de Absorción Atómica, en el equipo solar

UNICAM 989 del laboratorio Ambiental de la CRC, a su respectiva longitud de onda, en un extracto obtenido mediante digestión ácida con una mezcla regia preparada con HClO₄: HNO₃ en relación 3:1. [42]

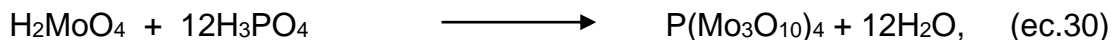
6.3.11 Determinación del contenido de Bases de cambio: Corresponden al Calcio, Magnesio, Sodio y Potasio, se determinaron en el primer extracto del tratamiento con Acetato de amonio (AcONH₄) la cuantificación se realizó por espectrofotometría de Absorción Atómica, en el equipo Thermo serie S4SN71203 de la unidad de análisis industriales de la Universidad del Cauca. [42]

6.3.12. Determinación de la capacidad de intercambio catiónico: Este método permite la cuantificación de bases intercambiables, tratando el fertilizante con acetato de amonio 1N pH 7 y luego el amonio adsorbido se desplaza con NaCl, se determina el NH₄⁺ desplazado agregando formol neutralizado al 40% y titulando el HCl generado con NaOH 0.1N en presencia de fenolftaleína. [40]



6.4 EVALUACIÓN DEL FÓSFORO DISPONIBLE.

Se aplica el método de Bray II o método de Olsen de acuerdo con el valor del pH Obtenido. En el método de Bray II utilizado para materiales de carácter ácido, el ion fluoruro precipita el calcio soluble por lo que extrae las formas P-Ca más solubles. También compleja al aluminio por lo que este extractante es específico para el CaHPO₄ y P-Al y no tanto para las formas básicas de P-Ca ó compuestos P-Fe. Una vez extraído el fósforo se procede a su determinación por el método colorimétrico, el cual consiste en formar un complejo del fósforo con ácido molíbdico, que absorbe a cierta longitud de onda. El método cloro molíbdico utiliza una solución de HCl-(NH₄)₆Mo₇O₂₄ · 4H₂O donde al reaccionar produce H₂MoO₄. [43]



El H₂MoO₄ Hetero compuesto incoloro, que por reducción forma un compuesto de color azul que absorbe a 660 y 835 nm, siendo la banda de mayor intensidad la de 660 nm. La reducción se hace con ácido ascórbico. [43]

En el método de Olsen se utiliza como solución extractora una solución de bicarbonato de sodio para extraer fosfatos de Fe y Al que son solubles en medio básico [42]. La determinación se hace de igual forma que en el caso anterior

6.5. EVALUACIÓN DEL FÓSFORO ORGÁNICO.

Se determinará colorimétricamente a 660 nm en el sobrenadante de la extracción de una muestra de gallinaza con H_2SO_4 0.6 N en una relación 1:50 después de haber sido calcinada a 550°C y se aplica el mismo procedimiento a otra muestra sin calcinar. La diferencia entre los contenidos de P de las dos extracciones dará el contenido de P orgánico. ^[43]

6.6. DETERMINACIÓN DE FÓSFORO TOTAL.

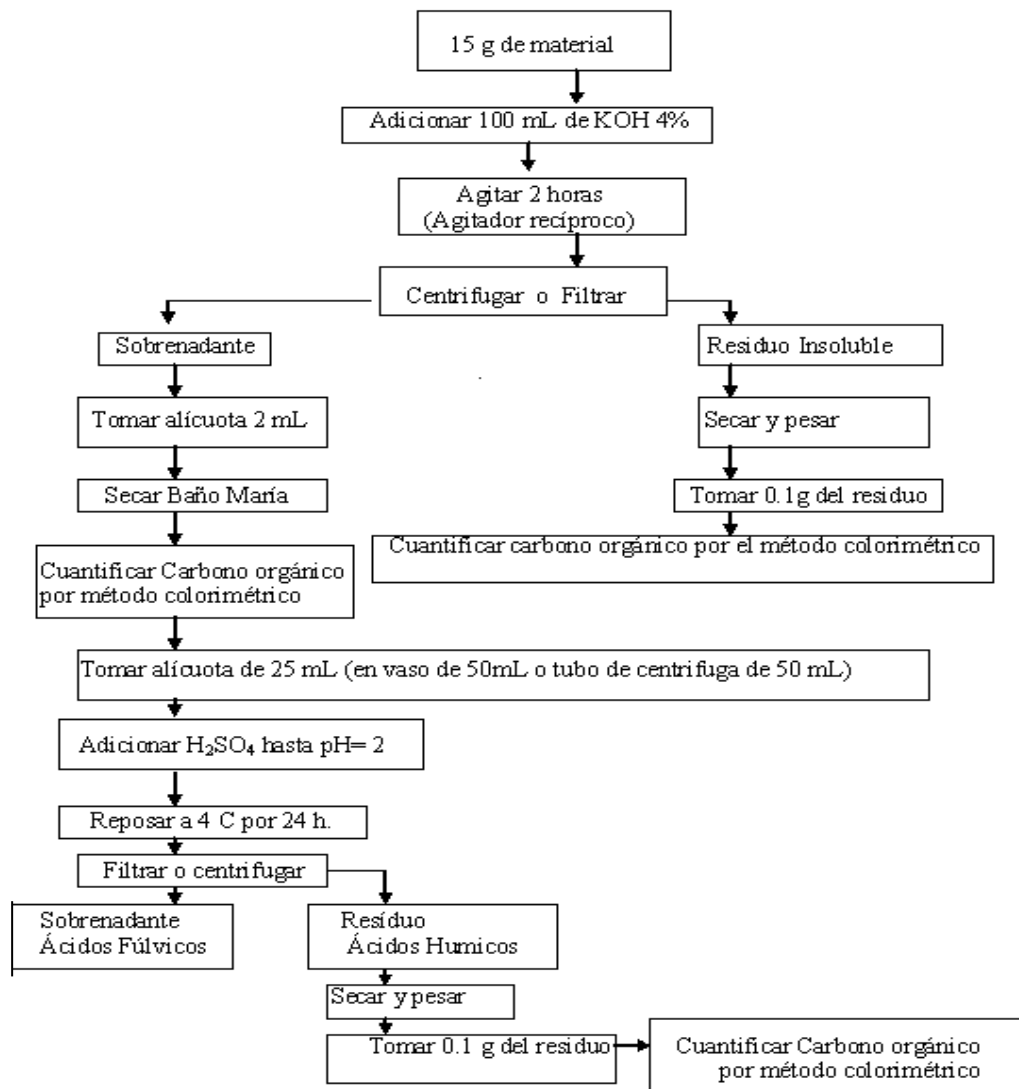
Se determina colorimétricamente a 660 nm en una solución obtenida a partir de la digestión de gallinaza con una mezcla de HClO_4 : HNO_3 (1:3). ^[43]

6.7. Caracterización de la fracción húmica.

Por definición los materiales húmicos son de origen pedogenético y analíticamente es la fracción de materia orgánica (carbono orgánico) extraíble o soluble en medio alcalino. ^[39]

Determinación de carbono orgánico del extracto húmico total (CEHT): El extracto húmico total se define como el contenido de carbono total extraíble en medio alcalino. Para su caracterización se sigue el Procedimiento detallado en la Figura 10. ^[41]

Figura 10. Marcha analítica para la caracterización de la fracción húmica en materiales orgánicos.



6.8. EVALUACIÓN DE LA FORMA DE INCREMENTAR LA DISPONIBILIDAD DE FÓSFORO EN LA GALLINAZA.

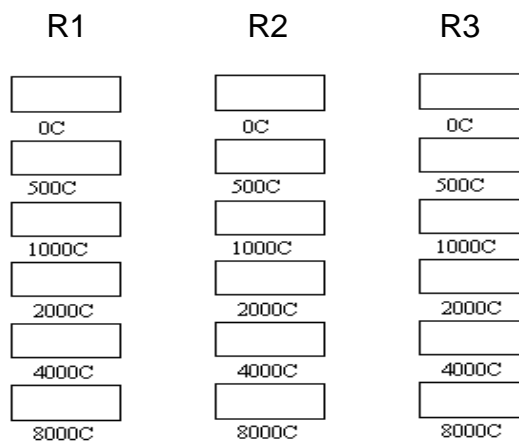
6.8.1. Extracción Del Fosforo En Forma Soluble A Partir De La Muestra De Gallinaza Con Ácido Cítrico.

Para ello se hacen ensayos de hidrólisis y extracción con un ácido orgánico como el ácido cítrico, con el propósito de quelatar los metales que estén insolubilizando el P y de esta manera permitir la liberación del P para su posterior solubilización. Se ensayan diferentes concentraciones del ácido mencionado, se incubaba una muestra de gallinaza con dichas soluciones a diferentes tiempos con agitación

mecánica y recíproca a 250 rpm durante 6 horas. [43] Posteriormente se obtiene soluciones de dicha incubación filtrando las suspensiones obtenidas y se evalúa en ellas el P soluble mediante método colorimétrico descrito anteriormente.

Se utiliza para esto un diseño estadístico completamente aleatorio con 6 tratamientos consistentes en las dosis de ácidos a aplicar con 3 réplicas por dosis, utilizando el método en paralelo, para un total de tratamientos, como se muestra en figura 11.

Figura 11. Esquema de Diseño experimental de Tratamiento de gallinaza con Acido Cítrico



OC: gallinaza sin acido cítrico; 500C: gallinaza con 500ppm de acido cítrico; 1000C: gallinaza con 1000ppm de acido cítrico; 2000C: gallinaza con 2000ppm de acido cítrico; 4000C: gallinaza con 4000ppm de acido cítrico, 8000C: gallinaza con 8000ppm de acido cítrico.

6.8.2. Extracción Del Fosforo En Forma Soluble A Partir De La Muestra De Gallinaza Mediante Encalamiento Con Dolomita.

El Proceso de encalamiento se hace de acuerdo al requerimiento de cal, incubando una cantidad determinada de gallinaza con dosis crecientes de una solución de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 0.04N de acuerdo al método de requerimiento de cal de suelos descrito en la guía de Agroquímica de la Universidad del Cauca. Igualmente la incubación se hará con cal dolomita y cal agrícola. [43] Una vez hallado el requerimiento de cal se evaluara las formas de P disponible mediante los métodos descritos anteriormente, para cada punto de pH alcanzado con la adición de cal.

6.9. Tratamiento Estadístico.

Los datos obtenidos inicialmente se someten a pruebas de normalidad y de acuerdo a estos resultados se aplicarán pruebas paramétricas o no paramétricas para saber si existen o no diferencias significativas entre los diferentes tratamientos, dependiendo de ello se harán pruebas de correlación entre las diferentes isoterma obtenidas. Se aplico como herramienta el paquete estadístico SPSS11.5.

7. RESULTADOS Y ANÁLISIS

EVALUACIÓN DE LA GALLINAZA DE ACUERDO A LA NORMA ICONTEC DE204/02

Tabla 3. Caracterización de la gallinaza obtenida comercialmente.

Propiedad	Valor Promedio de tres replicas	Desviación estándar (+.)	CV=(d/pro)*100
% de volatilización.	79.801	0.254	0,319
% de cenizas.	20.190	0.254	0,001
Densidad.	0.437	0.00	0,030
% de humedad.	12.336	0.012	0,100
% de saturación de agua.	449.446	0.017	0,004
conductividad eléctrica ms/cm.	67.833	0.289	0,426
pH.	6.54	0.015	0,234
C.I.C (meq/100g de gall.)	67.171	0.118	0,176
Materia orgánica.	76.625	0.081	0.106
% de C.	44.446	0.047	0,106
% de nitrógeno.	3.882	0.007	0,174
relación C/N.	11.449	0.026	0,229
Ca disponible (meq/100g de gall.)	46.555	1.220	2.621
Mg disponible (meq/100g de gall.)	71,791	0.639	0,890
K disponible (meq/100g de gall.)	49.736	0.117	0,234
Na soluble(meq/100g de gall.)	48.362	0.178	0.369
Ca/Mg.	0,648	0.020	3,225
CaO Total. (%)	4.159	0.193	4,645
%MgO Total.	2.666	0.047	1.772
%K ₂ O.	2.540	0.006	0.229
P disponible (ppm).	1125.635	4.952	0.440
P orgánico (ppm).	8030,765	48.551	0,609
P ₂ O ₅ Total. (%)	2,350	0.102	1,923
Σ NPK.	8.770	0.125	0.364
Zn disponible (ppm).	6.274	0.051	0.809
Cu disponible (ppm).	2.871	0.051	1.764
Fe disponible (ppm).	5.500	0.290	5.268
Mn disponible (ppm).	7.853	0.027	0.348
Zn total (ppm).	457.364	3.553	0.777
Cu total (ppm).	86.930	1.326	1.526
Fe total (ppm).	480.779	3.014	0.627
Mn Total (ppm)	239.999	3.026	1.261

7.1. Valoración de las propiedades Físicas.

7.1.1. Porcentaje de cenizas: El porcentaje de cenizas muestra que la gallinaza presenta alto contenido de minerales tales como calcio sodio potasio entre otros lo que indica que esta enmienda orgánica es un aporte importante de estos nutrientes.

7.1.2. Densidad: El valor encontrado se ajusta a la Norma Técnica Colombiana, ^[41] según la cual la densidad de un abono orgánico debe ser máximo de 0.6 g/cm³. La densidad para un bioabono está relacionada con el contenido de MO y el grado de humificación, ya que si presenta una buena estructura, sus partículas migajosas permiten una forma esférica con alta superficie específica suministrando una buena aireación, drenaje y retención de agua

7.1.3. Humedad en Base Seca: Se observa en la tabla 3 que la gallinaza, presenta una humedad óptima de acuerdo a la Norma Técnica Colombiana ^[41], que regula como máxima humedad el 20%. Esta humedad garantiza una estabilidad del abono orgánico, sin permitir el fenómeno de diestérisis. El porcentaje de humedad apropiado para que el material permanezca estable característica que ayuda a no descomponerse al ambiente y preservar sus propiedades físicas químicas biológicas

7.1.4. Porcentaje de Saturación o Capacidad de Retención de Agua: El valor de porcentaje de retención de agua supera su propio peso, por lo tanto cumplen con lo estipulado en la Norma Técnica Colombiana, ^[41] relacionado con el contenido de MO presente en el abono y como se mencionó anteriormente a una adecuada bioestructura. Es muy importante, ya que esta característica ayuda a la enmienda a retener un alto contenido de agua propiedad que puede ser aprovechada en el suelo cuando este abono orgánico es incorporado al mismo ya que este puede absorber suficiente agua y no dejar lixiviar los nutrientes presentes en ella, esto puede ser útil en suelos con un drenaje alto o un alto nivel de lixiviación

7.1.5. Conductividad Eléctrica: Según la norma ICONTEC, ^[41] no existe un valor apropiado de conductividad eléctrica para un abono orgánico. Comparando el valor encontrado en este abono con el de abonos orgánicos realizados por Medina et al (2004)^[44], se encuentran valores muy similares cercanos a 92 ms/cm, indicando un alto contenido de sales solubles, provenientes de calcio, magnesio y principalmente de potasio, ya que según este análisis, estos valores son altos, siendo así favorable para abonar plantas en suelos ácidos como los del Cauca en donde existe gran deficiencia de estos cationes. Presenta la ventaja de un bajo contenido de sales provenientes de sodio, las cuales producen serios problemas de acumulación de sodio en la capa intercambiable, originando posteriormente problemas al suelo. Esta conductividad también está relacionada con la alta CIC encontrada para este abono y con el alto contenido de cenizas.

7.1.6. Pérdidas por Volatilización: De acuerdo a la Norma Técnica Colombiana. ^[41] el valor apropiado de cenizas debe estar dentro de un rango de 18-56%, el valor de cenizas encontrado en la gallinaza fue de 20.4% reportado en la tabla 3 cumplen con la norma, este porcentaje está relacionado con el contenido de material inorgánico presente en el abono, indicando nuevamente un alto contenido de minerales como se analizó anteriormente. Un adecuado valor para el porcentaje de cenizas y MO, implica menores pérdidas por volatilización, menor material orgánico volátil, es decir un mayor contenido de carbón orgánico fijo, que significa presencia de sustancias húmicas estables no volátiles que le confieren a este abono estabilidad química, que al llegar al suelo favorecerán la formación de complejos arcillo-húmicos estables que permiten la formación de un humus apropiado confiriéndole de esta manera una adecuada bioestructura al suelo.

7.2. Valoración de las propiedades Químicas.

7.2.1. pH: El valor de pH en la gallinaza se encuentran dentro del rango óptimo (6-8.5) de acuerdo a la Norma Técnica Colombiana ^[41]. La mayoría de suelos del Cauca son de carácter ácido, esto permite que cuando la enmienda es aplicada al suelo, en primer lugar mejorar las condiciones químicas de estos suelos. Además se puede comportar como un buffer debido a sus características tales como su alto contenido de materia orgánica, alto contenido de bases de cambio y su alto porcentaje de extracto húmico total que indica la presencia de altos contenidos de sustancias similares a las sustancias húmicas, formando así las conjugaciones de los ácidos húmicos o fúlvicos. Propiedades química que le impiden cambiar de pH fácilmente, ayudando al suelo a regular dicha propiedad la cual va contribuir a mejorar sus propiedades físicas químicas y biológicas, además de tener un pH apropiado para la asimilación de todos los nutrientes y para una óptima actividad de los microorganismos del suelo.

7.2.2. Capacidad de Intercambio Catiónico: Según la norma ICONTEC ^[41], el valor mínimo para un abono orgánico debe ser mínimo de 30 meq/100g. En este caso el valor obtenido es 2.3 veces superior al requerimiento, atribuible al alto contenido de MO, siendo una condición ideal puesto que garantiza alta retención de nutrientes disponibles, como Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ y NH_4^+ , nutrientes fijados por el complejo arcilloso-húmico y que están en constante equilibrio con los cationes de la solución del suelo, impidiendo su pérdida por lixiviación y de esta manera garantiza una fuente permanente de nutrientes, reserva de los mismos que serán liberados cuando estos no se encuentren en la solución o por el contrario serán retenidos cuando el suelo tenga una abundancia en nutrientes para las plantas. Un valor alto de CIC también puede indicar un alto grado de humificación, coloide electronegativos capaces de retener cationes

7.2.3. Materia Orgánica: De acuerdo a la Norma técnica Colombiana. ^[41] los abonos orgánicos deben presentar un contenido de MO mínimo del 25.86%. En la gallinaza analizada supera este valor o de MO, y por esto se puede catalogar como un abono orgánico, que de por sí conlleva una alta carga microbiana necesaria para la descomposición de la MO en suelos con bajo grado de mineralización. Además puede servir como fuente de MO para suelos altamente mineralizados. Sin embargo, es necesario tener sumo cuidado en su aplicación, porque su contenido de MO es tan alto, que puede indicar que el material no ha sido estabilizado mediante un proceso adecuado y que al llegar al suelo puede producir efecto primming, llevando una alta carga microbiana que puede competir con los microorganismos propios del suelo, causar una fuerte mineralización de la MO nativa del suelo y de esta manera liberar altos niveles de CO₂ y de NH₃ gases efecto invernadero, además de generar procesos de erosión.

7.2.4. Nitrógeno: Aún cuando la Norma no estipula el valor óptimo para este elemento, sí plantea expresar su contenido si este es mayor del 1% y además propone que la sumatoria de los tres macronutrientes debe ser cercana a 10%, lo que indicaría que el nivel óptimo de N debería estar alrededor de un 3%. El valor encontrado para la gallinaza analizada es del 3.882%, de lo cual se puede inferir que este abono tiene la posibilidad de actuar como fuente principal de nitrógeno cuando aplicado al suelo deficiente en este nutriente, mejoraría sus condiciones de fertilidad. Sin embargo un alto contenido de nitrógeno no garantiza mejor calidad en un bioabono, por eso se debe tener en cuenta la relación C/N, que indica si existe un proceso de mineralización adecuado.

En la gallinaza de la relación C/N, es de 11.5 y según Kiehl et al ^[45] un humus maduro debe llegar a una relación C/N de 12, indicando por lo tanto que la gallinaza analizada presenta un grado de mineralización adecuado y que por lo tanto, el N orgánico presente se puede mineralizar fácilmente a formas disponibles para los cultivos.

7.2.5. Fósforo: El porcentaje de fósforo en la gallinaza es de 2.382%. De igual forma que el nitrógeno, la Norma no estipula el valor óptimo para este elemento, pero sí plantea expresar su contenido. Este es mayor del 1% por lo que debe estar alrededor de 3% considerando la sumatoria de los tres macronutrientes.

La cantidad de fósforo en la gallinaza es apreciable en sus formas orgánicas y disponibles lo que indica que se puede considerar como fuente de este nutriente para suelos Andisoles tan limitados debido a sus propiedades químicas y físicas donde es fijado por procesos de quelatación, sustitución Isomórfica, reacciones de precipitación entre otras.

El P orgánico constituye el 77.9 % del P total, atribuible a la alta concentración que presentan los piensos suministrados a las gallinas, los cuales presentan una gran cantidad de fitatos de calcio y magnesio (ésteres fosforados del inositol). ^[5,7]

y como estas aves no pueden romper esta estructura en su organismos debido a la deficiencia de enzimas como fitasas, dichos compuestos pasan por su tracto intestinal sin sufrir ningún cambio para luego ser expulsadas en su deyecciones. Sin embargo, al llegar al suelo por procesos de mineralización se convierte en formas asimilables para las plantas: H_2PO_4^- predominante en suelos ácidos y HPO_4^{2-} en suelos básicos, a través de las fosfatasas ácidas y/o alcalinas. El fósforo disponible en la gallinaza corresponde al 10.63% del P total, 1126 ppm, alto contenido si se lo compara con otros abonos orgánicos obtenidos de residuos de cosecha y de flores 220 ppm según Medina ^[44] y Bravo. ^[46,47]

De esta manera se corrobora su alta disponibilidad, constituyéndose en un aporte importante para la agricultura en el Cauca. Sin embargo, al llegar al suelo es posible que debido a las múltiples reacciones que puede sufrir se pueda fijar y volver indisponible. Debido a la gran importancia de este elemento para el suelo y para las plantas esta cantidad de fósforo es muy importante para el desarrollo de las mismas y su contenido en forma

7.2.6. Contenido de K_2O .

El contenido de potasio adecuado para un bioabono está en el rango del 1-3 % de K_2O de acuerdo a la norma Colombiana ^[41]. La gallinaza presenta un valor de 2.54%, cumpliendo con este requisito indicando que puede ser fuente de este nutriente para el suelo. El potasio puede provenir del alimento suministrado a las gallinas durante su ciclo alimenticio. El K disponible correspondiente al intercambiable también es alto y corresponde al 91% del total, siendo altamente soluble, pero al llegar al suelo también puede perderse fácilmente por lixiviación a través del perfil del suelo, también puede ser fijado dentro de las láminas de arcilla, puesto que su tamaño es similar al diámetro del hueco de los hexágonos de las arcillas.

7.2.7. Contenido de CaO .

Con base en el requisito establecido por la Norma ICONTEC, ^[41] este abono supera el valor mínimo del 2% para el contenido de calcio, indicando que es una fuente rica en este nutriente. Es importante resaltar que el abono en estas condiciones es adecuado para suelos ácidos como los del Cauca donde generalmente debido a la muy fuerte acidez, existe fuerte deficiencia de este elemento. Este alto contenido de calcio hace un aporte significativo a la CIC, altamente ventajosa para un fertilizante organomineral. El Ca inmediatamente disponible corresponde al 31.3% del total que posiblemente se encuentre en forma de fosfato de calcio soluble a valores de pH ácido. El restante se puede encontrar en forma de fitatos de Ca formas no solubles o asimilables por la planta. Este alto contenido de Ca proviene también del pienso suministrado a las gallinas, el cual

no es totalmente digerible y pasa a través de su sistema digestivo en las eyecciones.

7.2.8. Contenido de MgO.

El Mg disponible evaluado mediante el Mg intercambiable corresponde al 53.8% del total (2.66%), Con base en la norma ICONTEC [41], se puede catalogar como una fuente de este nutriente para las plantas, ya que su contenido debe ser de 2%. El restante se puede encontrar en forma de fitato de Mg. El contenido de MgO disponible o soluble es superior al del Ca, posiblemente porque el fitato tiene mayor afinidad por el Ca según Centeno ^[18]. Como consecuencia de esto, la relación Ca/Mg (0.65) es baja, de tal manera que al llegar al suelo, se presentará un efecto negativo sobre el mismo debido a la competencia que se va a presentar entre estos dos nutrientes induciendo así una deficiencia de calcio.

Este tipo de elementos se presentan en la gallinaza debido a la alimentación que presentan las aves ya que sus piensos tienen un alto contenido de sales orgánicas (en su mayoría ácidos que han formado sales con metales como Ca, Mg, K), dichas sales no son completamente digeribles por las aves en este caso las gallinas, por lo tanto son desechadas en sus deyecciones.

7.2.9 Σ NPK.

De acuerdo a la norma ICONTEC, la sumatoria debe ser cercana a 10, parámetro cumplido por la gallinaza analizada, indicando que se puede catalogar como fuente de estos macronutrientes

7.2.10. Contenido de Na.

La norma ICONTEC, ^[41] no reporta un valor apropiado de porcentaje de sodio para un abono orgánico. La gallinaza analizada presenta valores inferiores (<1%) de acuerdo a los datos reportados por Medina ^[44], aspecto favorable ya que de esta manera no presenta riesgos de salinización por este elemento.

7.2.11. Microelementos

Según Arango ^[48] y Bravo, ^[46] el contenido de Cobre en un bioabono propuesto por la asociación Alemana para la calidad del compost, BGGK debe ser mínimo de 43 ppm, pero de acuerdo a Kiehl ^[45] para que un abono orgánico sea considerado como fuente de este nutriente, el contenido debe ser de 500 ppm. La gallinaza analizada presenta serias deficiencias de este nutriente y por lo tanto no se puede considerar fuente de Cu para los suelos.

De acuerdo a los mismos autores anteriores, el contenido de Zn en un abono orgánico debe estar alrededor de 500ppm, la gallinaza presenta un valor de

6.23ppm en forma disponible y 456 ppm en forma total es decir que este abono puede ser considerado como fuente de este micronutriente.

Con respecto al hierro y el manganeso, la Norma Técnica Colombiana, ^[41] no reporta requerimientos para estos microelementos, sin embargo de acuerdo a Kiehl ^[45], para un bioabono el contenido de hierro debe ser 1000 ppm y de manganeso de 200ppm. La gallinaza analizada presenta 480 ppm de hierro y 240 ppm de manganeso valores que se reportan en la tabla 3, aunque presenta una deficiencia de hierro pero en el caso de manganeso presentando un valor adecuado.

7.2.12. Evaluación del grado de Humificación

Los resultados se expresan en la tabla 4

Tabla 4. Valoración del Sustancia Húmicas Presentes en la Gallinaza

Parámetros estadísticos	%C total	%EHT	CNE %	CAH	CAF	Hr	Hr1
Promedio	43.41	39.39	4.02	14,56	24,832	0.10	0.58
Desviación estándar	0,69	0.79	0,103	0,401	0,394	0,21	0,013
% CV	1,59	2.02	2.55	2,753	1,59	4,50	1,640

La NORMA TECNICA COLOMBIANA, ^[41] establece un valor mínimo de 30% en el extracto húmico total para un abono orgánico, lo mismo reporta Inbar ^[49], requisito cumplido por la gallinaza analizada, por lo tanto se puede considerar como un abono orgánico. Sin embargo, Este valor del extracto húmico total no quiere decir que todo el carbono presente se encuentre en forma de ácidos húmicos.

➤ Evaluación del grado de Humificación.

Existen varias formas de evaluar el grado de humificación, Sequi, ^[50] tiene en cuenta los contenidos de carbono asociados con las sustancias humificadas (fenólicas) y no fenólicas (no humificadas) y define en términos del contenido de carbono presente en la fracción no humificada, dividido por el contenido de carbono de las fracciones húmica y fúlvica. Generalmente, disminuye cuando la humificación de la materia orgánica aumenta. Se considera que valores menores a 0.3, pero idealmente por debajo de 0.2, indican un grado de humificación aceptable. Si se tiene en cuenta este concepto, como se observa en la tabla 3, la gallinaza presenta un alto grado de humificación. En estudios de diversos materiales Senesi, ^[51] establece ciertos límites para este índice, generalmente,

para desechos orgánicos y lodos es mayor que 0.5, pero por lo general varía entre 0.5 y 1. Para un compost maduro su valor es siempre menor que 1, cumpliendo la gallinaza analizada también con este parámetro.

De acuerdo a Bravo ^[46] y Arango, ^[48] el grado de humificación en el compostaje de residuos de cosechas, y de excrementos de gallina y vacunos encontrando que este parámetro evidencia la humificación experimentada por la materia orgánica sometida al proceso de compostaje. Estos autores muestran valores iniciales en el material sin compostar de 0.45, después de 90 días de compostaje su valor se reduce hasta 0.22, al final del proceso, 151 días, alcanza un valor de 0.2. La gallinaza analizada tiene un valor de 0.1

Aún cuando se deduce un alto grado de humificación, se observa que el C de AF es superior al de AH, conllevando así a una gran problemática en el suelo especialmente en suelos ácidos como los que se tiene en el Cauca, debido a que los AF son capaces de solubilizar Aluminio de las láminas de arcillas o de los alófanos generando más acidez a dichos suelos y con la posibilidad de percolar hasta los cuerpos de agua, generando así un problema de contaminación por este elemento. Además las altas dosis de gallinaza aplicadas a suelos pueden generar de esta manera proceso de erosión con pérdidas grandes de suelos.

7.3. EVALUACIÓN DE LA FORMA DE INCREMENTAR LA DISPONIBILIDAD DE P EN LA GALLINAZA

Con el propósito de incrementar la disponibilidad o solubilidad del P en la gallinaza estudiada, se aplicaron dos tratamientos a saber:

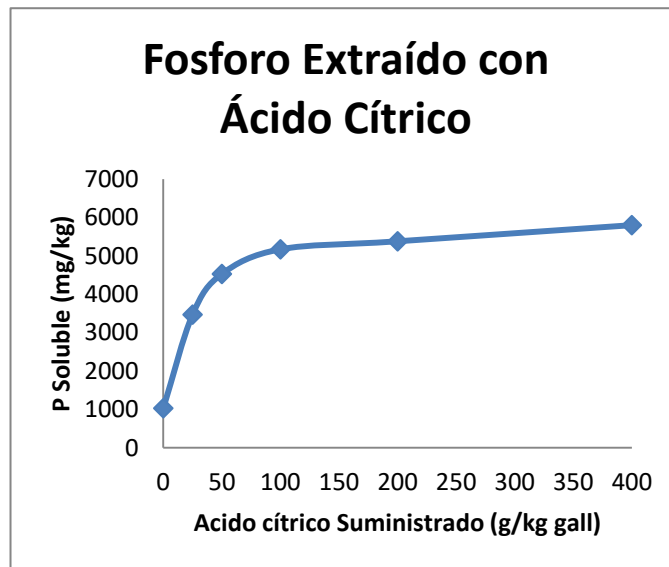
7.3.1. Extracción Del Fosforo En Forma Soluble A Partir De La Muestra De Gallinaza Con Ácido Cítrico.

Considerando el problema que pueden generar las gallinazas como se mostró anteriormente, pero teniendo en cuenta el alto contenido de P disponible y orgánico, se decidió hacer una extracción de este nutriente con Acido Cítrico, con el propósito de quelatar los metales que estén insolubilizando el P y de esta manera dejarlos libres para su posterior solubilización. Los resultados se presentan en la tabla 5 y figura 12 corresponden a la extracción en 5 g de gallinaza comercial a un promedio de tres réplicas

Tabla 5. Extracción de fósforo con diferentes concentraciones de ácido.

Tratamiento	(Concentración de ácido Cítrico ppm)	Gramos ácido Cítrico/Kg gallinaza	P extraído (P soluble) mg P/Kg gallinaza	Desviación estándar (s)	Coefficiente de variación
1	0	0.000	1026,611	1,505	0,147
2	500	25.000	3465,541	21,627	0,624
3	1000	50.000	4524,444	14,297	0,316
4	2000	100.000	5169,689	12,546	0,243
5	4000	200.000	5378,305	15,405	0,286
6	8000	400.000	5827,937	25,230	0,433

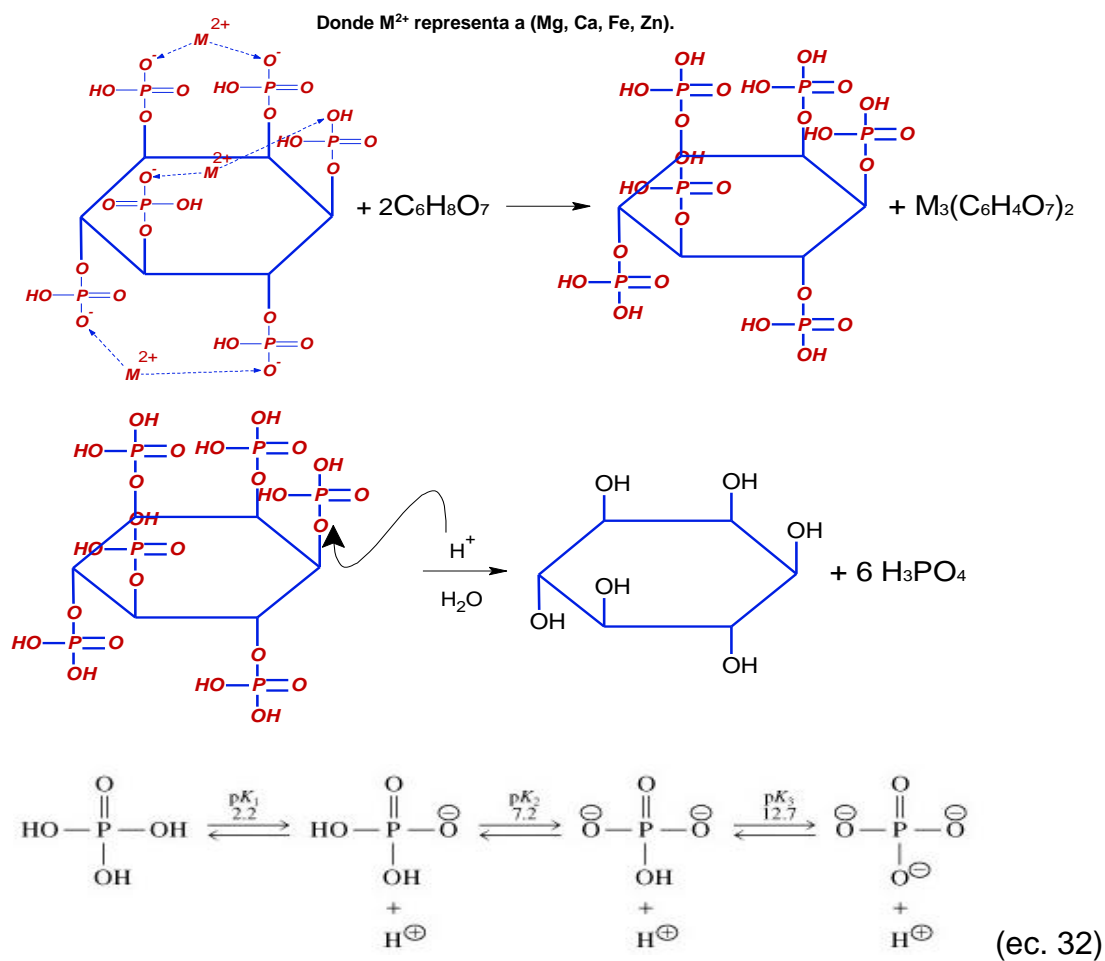
Figura 12. Fosforo Extraído con Ácido Cítrico



Los resultados muestran que el tratamiento con ácido cítrico efectivamente extrae P de la gallinaza, en forma proporcional a su concentración. Se observa una forma asintótica, en donde inicialmente pequeños cambios en la concentración de ácido cítrico suministrado producen grandes cambios en la cantidad de P extraído hasta llegar a una dosis de 100 g de ácido cítrico/Kg de gallinaza. A partir de esta

dosis el incremento ya no es tan alto, indicando que ésta puede considerarse como la dosis adecuada para obtener una extracción óptima de P. Se denota que el incremento de la solubilidad del P está comprendido entre un 237% y 468%. Se podría atribuir esta extracción a la formación de quelatos con metales como el hierro y el magnesio dejando libre al fitato, que posteriormente en el medio ácido liberan el P en forma de H_2PO_4^- o de HPO_4^{2-} de acuerdo a los valores de pH obtenido en los diferentes extractos como se muestra en la tabla 6 y figura 14 y de acuerdo a la química del ácido ortofosfórico como se muestra en figura 13.

Figura 13. Reacción del fitato con ácido cítrico.



Además como es sabido este ácido orgánico forma parte del metabolismo de las bacterias, por lo que podría suponerse que ellas consumen el ácido, produciendo la mineralización de los fitatos y dejando libre al fósforo en forma de ortofosfatos que pueden ser determinados colorimétricamente.

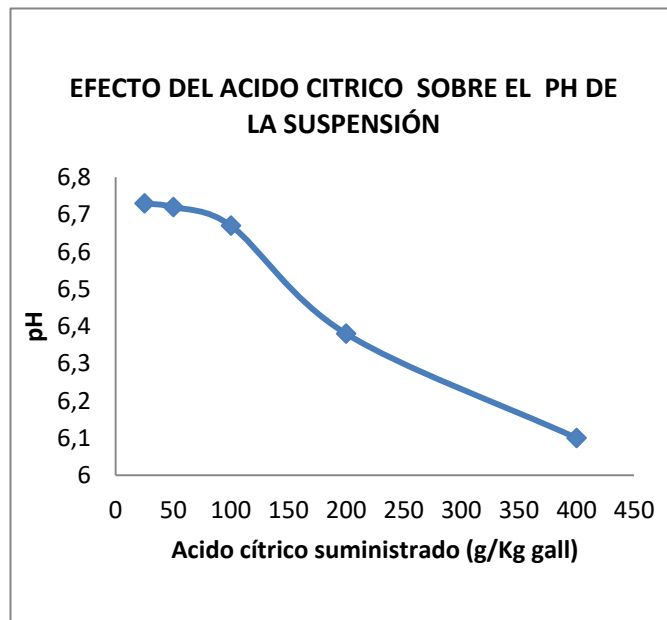
7.3.2. Efecto del tratamiento de la Gallinaza Con ácido Cítrico sobre el pH

Además de evaluar el P disponible se valoró el pH de cada tratamiento, los resultados se presentan en la tabla 6 y figura 14

Tabla 6. Efecto del tratamiento de la gallinaza con ácido cítrico sobre el pH.

Tratamiento	Acido Cítrico Suministrado g/Kg gallinaza	pH
1	0.00	6,74
2	25.00	6,73
3	50.00	6,72
4	100.00	6,67
5	200.00	6,38
6	400.00	6,1

Figura 14. Efecto del acido cítrico sobre el pH de la suspensión



Como se observa, el tratamiento con ácido cítrico muestra una disminución en el valor de pH a medida que aumenta su concentración, sin embargo, la disminución no es tan pronunciada, debido a que el ácido tiene la capacidad de formar sustancias buffer. Pero el cambio es suficiente para liberar el P en forma soluble.

Con el objeto de tener certeza en los resultados obtenidos, se aplica un tratamiento estadístico, inicialmente se someten los datos a la prueba de normalidad para definir si se aplican prueba paramétricas o no paramétricas. Los resultados se describen en la tabla 7, la cual muestra que en la mayoría de los casos, la significancia es superior a 0.05, indicando que se ajustan a la normalidad y por lo tanto se puede aplicar pruebas paramétricas.

Tabla 7. Pruebas de normalidad para el tratamiento con ácido cítrico

	Tratamiento	Shapiro-Wilk		
		Estadístico	gl	Sig.
PDisponible (ppm)	1	0,950	3	0,568
	2	0,997	3	0,891
	3	0,885	3	0,340
	4	0,757	3	0,016
	5	0,913	3	0,429
	6	0,752	3	0,005
pH	1	1,000	3	1,000
	2	0,964	3	0,637
	3	0,750	3	0,000
	4	1,000	3	1,000
	5	0,750	3	0,000

Se aplica por lo tanto la prueba de ANOVA cuyos resultados se muestran en la tabla 8

Tabla 8 Prueba de ANOVA para el tratamiento con ácido cítrico

		Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
PDisponible (ppm)	Inter-grupos	45183394,614	5	9036678,923	31373,651	0,000
	Intra-grupos	3456,408	12	288,034		
	Total	45186851,022	17			
pH	Inter-grupos	0,923	5	0,185	1846,589	0,000
	Intra-grupos	0,001	12	0,000		
	Total	0,924	17			

La prueba muestra que existe diferencia altamente significativa en los valores de P disponible de los diferentes tratamientos. Igualmente existe diferencia altamente significativa en los valores de pH de los diferentes tratamientos. Con el propósito

de conocer dónde radica la diferencia se aplica la Prueba de Duncan cuyos resultados se presentan en las tablas 9 y 10

Tabla 9. Prueba de Duncan P Disponible (ppm) para el tratamiento con ácido cítrico

Tratamiento	N	Subconjunto para alfa = .05					
		1	2	3	4	5	6
1	3	1125,634					
2	3		3465,540				
3	3			4524,443			
4	3				5169,690		
5	3					5378,306	
6	3						5827,936
Sig.		1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000

Se muestran las medias para los grupos en los subconjuntos homogéneos.
a Usa el tamaño muestral de la media armónica = 3,000.

Tabla 10. Prueba de Duncan para el pH

Tratamiento	N	Subconjunto para alfa = .05				
		1	2	3	4	5
6	3	6,12				
5	3		6,38			
4	3			6,66		
3	3				6,69	
2	3					6,72
1	3					6,73
Sig.		1,000	1,000	1,000	1,000	,128

Se muestran las medias para los grupos en los subconjuntos homogéneos.
a Usa el tamaño muestral de la media armónica = 3,000.

El análisis estadístico muestra que efectivamente el incremento de la dosis de ácido cítrico genera un incremento en el P disponible, en forma significativamente diferente, de tal manera que la mayor solubilidad se presenta con el tratamiento 6 correspondiente a la dosis de 400g /Kg de gallinaza y la menor solubilidad se obtiene con el tratamiento 1, sin aplicación de ácido cítrico, corroborando lo expresado anteriormente.

En la Prueba de Duncan para pH se aprecia igualmente que el mayor pH se obtiene con los tratamientos 1 y 2 entre los cuales no existe diferencia significativa, corresponde a las dosis de 0 y 25 g Acido Cítrico/Kg

respectivamente. El menor valor de pH se obtiene con el tratamiento 6 como era de esperarse ya que corresponde a la mayor dosis de ácido cítrico suministrado. Efectivamente con este análisis se puede corroborar que el pH influye en la solubilidad del P.

Si se realiza la prueba de Correlación de Pearson cuyos resultados se muestran en la tabla 11, se confirma la relación altamente significativa y positiva entre el P disponible y el tratamiento, de tal manera que a medida que aumenta el tratamiento (dosis de ácido Cítrico suministrado), aumenta el P disponible. Además en dicha tabla se aprecia que existe también una correlación negativa y altamente significativa entre el P disponible y el valor de pH, de tal manera que a medida que aumenta el valor de pH disminuye la cantidad de P disponible.

Todo el análisis estadístico aplicado permite por lo tanto deducir la hipótesis planteada en la solubilización del P por parte del ácido cítrico.

Tabla 11. Prueba de Pearson Correlaciones para el tratamiento con ácido cítrico.

		pH	P Disponible (ppm)	Tratamiento
P Disponible (ppm)	Correlación de Pearson	-0,662(**)	1.000	0,921(**)
	Sig. (bilateral)	0,003	.	0,000
	N	18.000	18.000	18.000
pH	Correlación de Pearson	1.000	-0,662(**)	-0,883(**)
	Sig. (bilateral)	.	0,003	0,000
	N	18.000	18.000	18.000

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

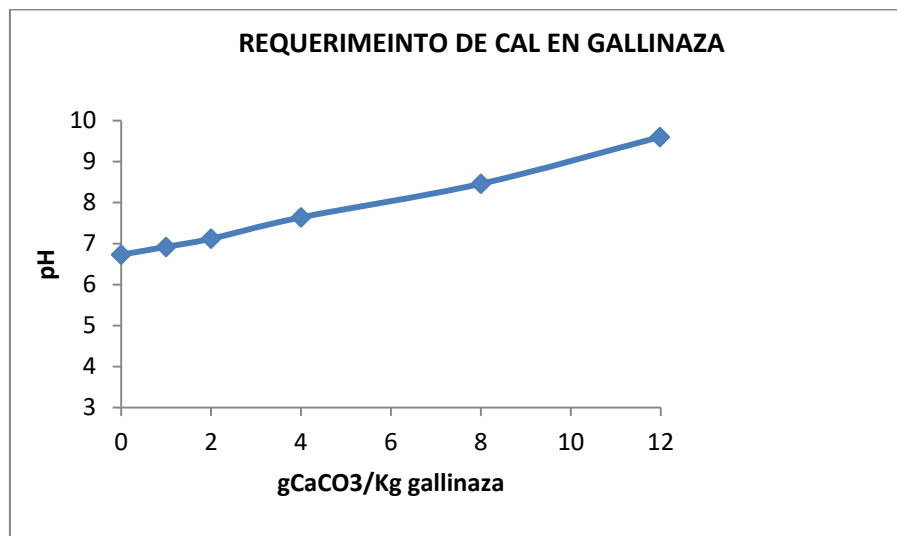
7.3.3. Extracción Del Fosforo En Forma Soluble A Partir De La Muestra De Gallinaza Mediante Encalamiento Con Dolomita.

Con el propósito de saber si el encalamiento incrementa o no la disponibilidad de P en la gallinaza, se realizó inicialmente la curva de requerimiento de cal. Los resultados se muestran en la tabla 12 y figura 15.

Tabla 12. Datos de Requerimiento de cal en gallinaza.

g CaCO ₃ /Kg gallinaza	pH
0.00	6,73
1.00	6,92
2.00	7,12
4.00	7,64
8.00	8,46
11,98	9,60

Figura 15. Requerimiento de cal de la Gallinaza



La curva muestra que a medida que se incrementa la cantidad de cal aplicada, incrementa el valor de pH, sin embargo inicialmente grandes incrementos en la cantidad de cal aplicada producen pequeños cambios en el valor de pH, atribuyéndose este al efecto tampón que puede tener la gallinaza, atribuible a las sustancias similares a las sustancia húmicas. El análisis estadístico inicial es la prueba de normalidad de los datos expresado en la tabla 13.

Tabla 13. Pruebas de normalidad Datos de Encalamiento

	Tratamiento	Shapiro-Wilk		
		Estadístico	gl	Sig.
pH	1	0,750	3	0,000
	2	1,000	3	1,000
	3	1,000	3	1,000
	4	0,750	3	0,000
	5	0,750	3	0,000
	6	0,750	3	0,000

La prueba muestra que la mayoría de los datos no se ajustan a la normalidad, por lo tanto se aplican pruebas no paramétricas como la de Kruskal Wallis relacionada en la tabla 14.

Tabla 14. Prueba de Kruskal-Wallis para Encalamiento.

Estadísticos de contraste(a, b).

	pH
Chi-cuadrado	16,648
gl	5.000
Sig. asintót.	0,005

a Prueba de Kruskal-Wallis.

b Variable de agrupación: Tratamiento.

La prueba muestra que existe diferencia significativa entre los valores de pH de los diferentes tratamientos. Para saber entre cuáles se aplica la prueba de Tukey

Tabla 15. Prueba de HSD de Tukey pH para encalamiento.

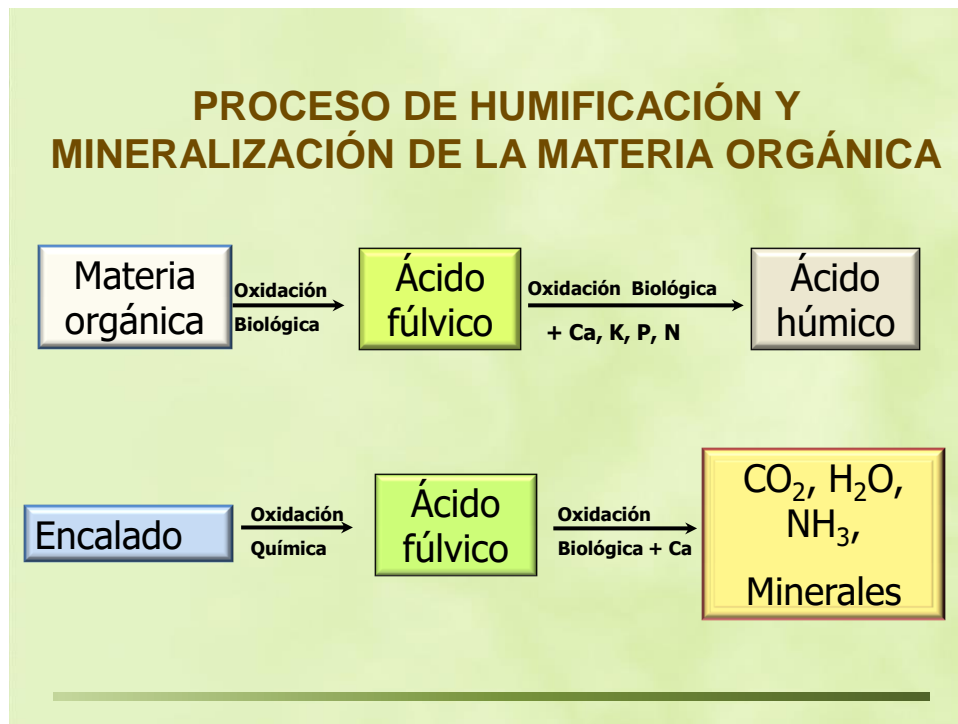
Tratamiento	N	Subconjunto para alfa = .05					
		1	2	3	4	5	6
1	3	6,73					
2	3		6,92				
3	3			7,12			
4	3				7,63		
5	3					8,46	
6	3						9,06
Sig.		1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000

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

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

La prueba indica que efectivamente hay diferencia significativa entre todos los tratamientos, siendo el pH del tratamiento 6 (400 g/Kg galli) significativamente superior al de los demás y el pH del tratamiento significativamente inferior a los demás valores como se manifestó anteriormente mostrando que la cal sí logra subir el valor de pH en dicha gallinaza en forma significativa Si se compara el efecto de la cal con el del ácido cítrico se puede observar que la cal rompe el efecto tampón de la gallinaza puesto que el incremento de pH es alto, mientras que el ácido cítrico produce efecto tampón a la gallinaza como es lógico debido a la formación de sales del ácido conjugado. Además las sustancias similares a las sustancias húmicas cuando se someten a dosis altas de Ca se mineralizan los ácidos húmicos y se convierten en ácidos fúlvicos que a la vez sufren proceso de mineralización generando gases como el CO₂ y el NH₃ de acuerdo a la figura 16, [52] rompiendo su efecto tampón.

Figura 16. Proceso de humificación y mineralización de la materia orgánica.



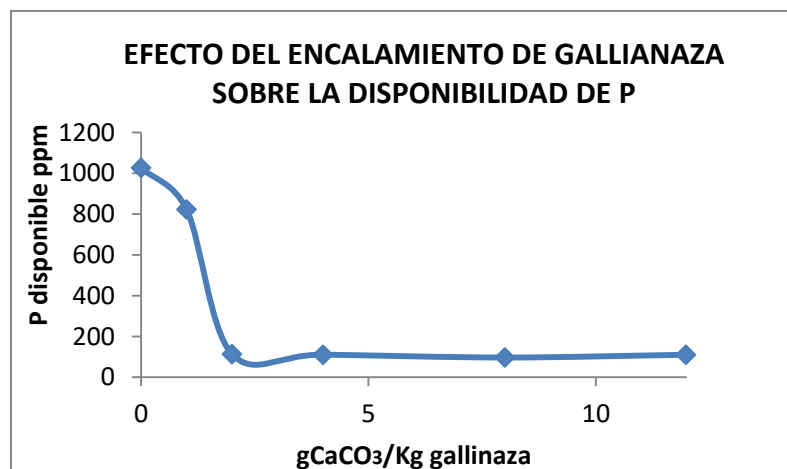
7.4.1. Efecto del encalamiento de gallinaza sobre la disponibilidad de P

Con el propósito de encontrar la mejor forma de liberar el P presente en la gallinaza, se realizó este tratamiento con cal dolomita. Los resultados se presentan en la tabla 16 y figura 17.

Tabla 16. Extracción de Fósforo en función del Encalamiento.

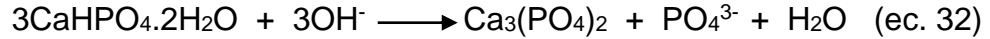
Tratamiento	Gramos carbonato de calcio/Kg gallinaza	P extraído (P soluble) mgP /Kg gallinaza	Desviación Estándar (s)	Coefficiente de Variación (%)
1	0.000	1026,611	1,505	0,147
2	1.00	1444,542	1,568	0,109
3	2.00	199,898	1,581	0,791
4	4.00	194,465	1,576	0,810
5	8.00	170,052	1,562	0,918
6	11,980	193,575	1,569	0,810

Figura 17. Efecto del encalamiento de gallinaza sobre la disponibilidad de Fósforo.



Se observa un efecto contrario al del ácido cítrico, ya que a medida que aumenta la dosis de cal aplicada disminuye considerablemente la cantidad de Fósforo soluble entre un 80% y 83%. Solamente la primera dosis correspondiente a 1g de cal logra subir el contenido de P soluble en un 40%. Este efecto está directamente relacionado con el valor de pH, puesto que a valores superiores a 6.73 se forman fosfatos de Ca y Mg insolubles como se muestra en las reacciones (31, 32,33). Este resultado es de suma importancia puesto que el encalamiento con altas dosis de cales agrícolas en nuestra región, sería contraproducente para la disponibilidad del P.





El análisis estadístico inicial de prueba de normalidad relacionado en la tabla 17, muestra que la mayoría de los datos no se ajustan a la normalidad ($\alpha > 0.05$). Por lo tanto se aplican pruebas no paramétricas como la de Kruskal-Wallis (tabla 18).

Tabla 17. Pruebas de normalidad Extracción de Fósforo con encalamiento

	Tratamiento	Shapiro-Wilk		
		Estadístico	gl	Sig.
P disponible	1	0,770	3	0,046
	2	0,778	3	0,062
	3	0,752	3	0,004
	4	0,755	3	0,012
	5	0,752	3	0,004
	6	0,752	3	0,004

Tabla 18. Prueba de Kruskal-Wallis para datos de Extracción de Fósforo con encalamiento

Estadísticos de contraste(a,b)	
	P disponible
Chi-cuadrado	16,111
gl	5.000
Sig. asintót.	0,007

a Prueba de Kruskal-Wallis.

b Variable de agrupación: Tratamiento.

Se observa que existe diferencia significativa del P disponible en función de los tratamientos ($\text{sig} < 0.05$). Aplicando la prueba de Tukey (tabla 19).

Tabla 19 Prueba Tukey Fósforo disponible con encalamiento

Tratamiento	N	Subconjunto para alfa = .05				
		1	2	3	4	5
5	3	170,052				
6	3		193,575			
4	3		194,465			
3	3			199,897		
1	3				1026,610	
2	3					1444,541
Sig.		1,000	,978	1,000	1,000	1,000

Se muestran las medias para los grupos en los subconjuntos homogéneos.
a Usa el tamaño muestral de la media armónica = 3,000.

En dicha tabla se aprecia que el mayor contenido de P soluble se obtiene con el tratamiento 2 (1g de cal dolomita) como se había manifestado anteriormente. El menor contenido se obtiene con el tratamiento 5 (8 g de cal dolomita). Además que no existe diferencia significativa entre los valores de P soluble 6 y 4 de los tratamientos.

Con el propósito de confirmar la hipótesis de la relación entre el incremento del valor de pH producido por el encalamiento y la cantidad de P soluble se aplica la prueba no paramétrica de Rho de Spearman relacionada en la tabla 20.

Tabla 20. Correlación de Rho de Spearman

		P disponible	pH	Tratamiento
P disponible	Coeficiente de correlación	1,000	-0,811(**)	-0,812(**)
	Sig. (bilateral)	.	0,000	0,000
	N	18.000	18.000	18.000
pH	Coeficiente de correlación	-0,811(**)	1,000	0,990(**)
	Sig. (bilateral)	0,000	.	0,000
	N	18.000	18.000	18.000

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

En dicha prueba se confirma que existe una correlación negativa altamente significativa entre el P disponible y el valor de pH, a su vez con el tratamiento o encalamiento, indicando efectivamente que a mayor valor de pH menor cantidad de P soluble.

8. Conclusiones

1. La gallinaza analizada cumple con los requisitos de la NORMA ICONTEC NTC 5167/2003 para ser catalogada como abono orgánico, fuente de la mayoría de los nutrientes esenciales, con excepción del Cu, para el desarrollo de los cultivos.
2. Aún cuando el contenido de extracto húmico total lo mismo que el grado de Humificación son altos, el C de sustancias similares a los ácidos fúlvicos supera considerablemente al C de sustancias similares al de ácidos Húmicos, generando así posible problemas de contaminación y erosión en suelos.
3. Las propiedades físicas presentes en la gallinaza cumplen con los requisitos necesarios según la NORMA ICONTEC, NTC 5167/2003, estas características le confieren propiedades importantes como la retención de agua y la densidad que presenta este material propiedades que puede ser útiles un suelos agrícolas del Cauca
4. La gallinaza contiene una cantidad considerable de nitrógeno 3.88 %, por tanto se podría catalogar como fuente principal de nitrógeno Sin embargo un alto contenido de nitrógeno no garantiza su disponibilidad total, pero la relación C/N, indica que existe un proceso de mineralización adecuado.
5. El Ca inmediatamente disponible corresponde al 31.3% del total, el Mg intercambiable corresponde al 53.8% del total, cantidades importantes que constituyen este abono como fuente de estos nutrientes esenciales para el desarrollo de las plantas.
6. La relación Ca/Mg (0.65) es baja, de tal manera que al llegar al suelo, se presentará un efecto negativo sobre el mismo debido a la competencia que se va a presentar entre estos dos nutrientes induciendo así una deficiencia de calcio
7. El fósforo disponible en la gallinaza analizada corresponde al 10.63% del P total, 1126 ppm, alto contenido si se lo compara con otros abonos orgánicos. Mientras que el P orgánico constituye el 77.9 % del P total, contenido que amerita convertirlo en forma mineral y disponible inmediatamente para las plantas
8. El tratamiento con ácido cítrico logró extraer altos contenidos de P soluble y se obtuvo un incremento en la disponibilidad de este nutriente en un rango comprendido entre 237% y 468%.

9. El tratamiento óptimo para realizar la extracción de P en forma soluble es el que utiliza una cantidad de 100 gramos de ácido cítrico por kilogramo de gallinaza ya que a partir de suministros mayores a esta cantidad el aumento en la extracción de P soluble no es muy significativo
10. El tratamiento con ácido cítrico muestra una disminución en el valor de pH a medida que aumenta su concentración, sin embargo, la disminución no es tan pronunciada, debido a que el ácido tiene la capacidad de formar sustancias buffer. Pero el cambio es suficiente para liberar el P en forma soluble.
11. El incremento en la cantidad de cal dolomita aplicada, incrementa el valor de pH, sin embargo inicialmente grandes incrementos en la cantidad de cal aplicada producen pequeños cambios en el valor de pH, atribuyéndose este al efecto tampón que puede tener la gallinaza, atribuible a las sustancias similares a las sustancias húmicas.
12. Si se compara el efecto de la cal con el del ácido cítrico se puede observar que la cal rompe el efecto tampón de la gallinaza puesto que el incremento de pH es alto, mientras que el ácido cítrico produce efecto tampón a la gallinaza como es lógico debido a la formación de sales del ácido conjugado.
13. El encalamiento produce un efecto contrario al del ácido cítrico, ya que a medida que aumenta la dosis de cal aplicada disminuye considerablemente la cantidad de Fósforo soluble entre un 80% y 83%. Solamente la primera dosis correspondiente a 1g de cal logra subir el contenido de P soluble en un 40%. Este efecto está directamente relacionado con el valor de pH, puesto que a valores superiores a 6.73 se forman fosfatos de Ca y Mg insolubles.
14. Se logró la obtención de fertilizantes líquidos con un contenido de P comprendido entre 3466-5799 ppm a partir de gallinaza comercial, mediante extracción con ácido cítrico en concentración de 25-400 gramos por kilogramo de gallinaza, siendo el óptimo fertilizante aquel extraído con 10 gramos de ácido/ Kg de gallinaza.

9. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

1. BRADY, N. and R. Weil. 1999. The Nature and Properties of Soils. 12th Edition. Prentice Hall, Inc. New Jersey.
2. CONTI, M. 1998. Principios de Edafología. 1era Edición. FAUBA.
3. KHASAWNEH, F. E. 1980. The role of phosphorus in agriculture. American Society of Agronomy, Inc. Crop Science of America, Inc. Soil Science Society of America, Inc.
4. IYAMUREMYE, F. and DICK, R.P. 1996. Organic Amendments and Phosphorus dynamics: I. Phosphorus Chemistry and sorption. *Soil Science*. 161: 426-435.
5. WYATT CJ, TRIANA- Tejas A. Soluble and insoluble Fe, Zn, Ca and phytates in foods commonly consumed in Northern Mexico. *J Agric Food Chem* 1994; 42: 2204-209.
6. ZHOU JR, ERDMAN JW Jr. 1995. Phytic acid in health and disease. *C.R.C. Crit Rev Food Sci Nutr*; 35, 495-508.
7. PETERSON DF, HARRIS DJ, Rayner CJ, Blakeney AB, Choct M. 1999. Methods for the analysis of premium livestock grains. *Australian J Agric Res*; 50: 775-87.
8. SEGUEILHA L, MOULIN G, Galkzy P. 1993 Reduction of phytate content in wheat bran and glandless cotton flour by *Schwanniomyces castellii*. *J Agric Food Chem*; 41: 2451-454.
9. WALSH GA, POWER RF, Headon DR. 1994. Enzymes in the animal- feed industry. *Trends Food Sci Technol*; 5: 81-87.
10. SUGIURA S H, RABOY V, Young KA, Dong FM, Hardy RW. 1999. Availability of phosphorus and trace-elements in low-phytate varieties of barley and corn for rainbow-trout (*Oncorhynchus mykiss*). *Aquaculture*; 170: 285-96.
11. BINDU S, SOMASHEKAR D, Joseph R. 1998: A comparative-study on permeabilization treatments for in-situ determination of phytase of *Rhodotorula gracilis*. *Letters in Applied Microbiology* 27: 336-40.
12. LIENER IE. 1994. Implications of antinutritional components in soybean foods. *CRC Crit Rev Food Sci Nutr*: 34: 31-67.
13. TABEKHIA MM, Luh BS. 1980. Effect of germination, cooking and canned on phosphorus and phytate retention in dry beans. *J Food Sci*; 45: 406-08.
14. SZKUDELSKI T. 1997. Phytic acid-its influence on organism. *J Anim Feed Sci*; 427-438.
15. SNIDER M, LIEBMAN M. 1992. Calcium additives and sprouted wheat effects on phytate hydrolysis in whole wheat bread. *J Food Sci*; 57 118-20.

16. HARLAND BF, OBERLEAS D. 1987. Phytate in foods. *Wld Rev Nutr Diet*; 52: 235-59.
17. KHAN N. ZAMAN R. ELAHI M. 1988. Effect of processing on the phytic acid content of bengal grams (*Cicer arietinum*) products. *J Agric Food Chem*: 36: 1274-276.
18. CENTENO C, VIVEROS A, BRENES A, CANALES R, LOZANO A, de la Cuadra C. 2001. Effect of several germination condition on total P, phytate P, phytase, and acid phosphatase activities and inositol phosphate esters in rye and barley. *J Agric Food Chem*. 49: 3208-215.
19. ANDERSON. RJ. 2002 Contribution to the chemistry of phytin. *J Biol Chem*; pag. 17- 171.
20. KNUCKLES BE, KUZMICKY DD, GUMBMAN MR, Betschart AA. 1989. Effect of myoinositol phosphate esters and *in vivo* digestibility of proteins. *J Food Sci* 54: 1348-50.
21. CHERYAN M. 1980. Phytic acid interactions in food systems. *C.R.C. Crit Rev Food Sci Nutr*; 13: 297-35.
22. HARLAND BF, Oberleas D. 1986. Anion exchange method for determination of phytate in foods: a collaborative study. *J AOAC*; 69: 667- 70.
23. THOMPSON LV. 1987. Reduction of phytic acid concentration in protein isolates by acylation techniques. *J AOCS*; 64: 1712-717.
24. WANG J. 1998. Improvement of citric-acid production by *Aspergillus niger* with addition of phytate to beet molasses. *Bioresource Technol*; 65: 243-45.
25. LOTT JNA, GREENWOOD JS, Batten GD. 1995. Mechanisms and mineral nutrient storage during seed development. En: *Seed Development and Germination*. J. Kigel. G. Galili. (Eds). Marcel Dekker. New York; p. 215.
26. FROSSARD E, BUCHER M, MÄCHLER F, MOZAFAR A, HURRELL R. 2000. Potential for increasing the content and bioavailability of Fe, Zn, and Ca in plants for human nutrition. *J Sci Food Agric*; 80: 861-879.
27. BHATTY RS, SLINKARD AE. 1989. Relationship between phytic acid and cooking quality in lentil. *Can Inst Food Sci Technol. J* 22: 137-42.
28. YOSHIDA KT, WADA T, KOYAMA H, MIZOBUCHIFUKUOKA R. NAITO S. 1999. Temporal and spatial patterns of accumulation of the transcript of myo-inositol-1-phosphate synthase and phytin- containing particles during seed development in rice. *Plant Physiol*; 119: 65-72.
29. WANG CF, TSAY SM, LEE CY, LIU SM, ARAS NK. 1992. Phytate content in taiwanese diet determined by ³¹p Fourier Transform Nuclear Magnetic Resonance Spectroscopy. *J Agric Food Chem*; 40: 1030-33.

30. NOLAN KB, DUFFIN PA, MCWEENY D.J. 1987. Effects of phytate on mineral bioavailability. *In vitro* studies on Mg, Ca, Fe, Cu, Zn, Cd. Solubilities in presence of phytate. *J Sci Food Agric*; 40: 79-85.
31. DESHPANDE SS, DAMODARAN S. 1989. Effect of phytate on solubility, activity and conformation of trypsin and chymotrypsin. *J Food Sci*; 54: 695-99.
32. HAN, YW. 1988. Removal of phytic acid from soybean and cottonseed meals. *J Agric Food Chem*; 36: 1181-83.
33. DUA S, Mahajan A, Mahajan 1996. A. Improvement of functional properties of rapeseed (*Brassica campestris* var. Toria) preparations by chemical modifications. *J Agric Food Chem*; 44: 706-10.
34. THOMPSON LU. 1993. Potential health benefits and problems associated with antinutrients in foods. *Food Res Int*; 26: 131-49.
35. SIMPSON K. 1991. Abonos y Estiércoles. Editorial ACRIBIA. Zaragoza-España. p.155
36. MALAGON, Dimas. LLINAS, Rubén. CHAMORRO, Clara. Suelos de Colombia. Origen, evolución, clasificación, distribución y uso. Santafé de Bogotá: IGAC, 1995.; p.43-48
37. PEÑA F. 1996. La gallinaza y su utilización en ganado de carne. En: *Revista Nacional de Zootecnia.*; p.111- 141
38. CASTELLÓ. 2000. La gallinaza. En: *Selecciones Avícolas.* España. 2000. p. 5-35
39. WITTCOFF, Harold A.; REUBEN, Bryan G. 2000. "Productos Químicos Orgánicos Industriales. Tecnología, Formulaciones y Usos" 2. Limusa. México, p. 408-409,412.
40. ROSKOSKI, ROBERT; 2001. McGraw-Hill Interamericana; Removal of phytic acid from soybean and cottonseed meals. *J Agric Food Chem*; p. 115-119
41. BARRETO, J .Norma Técnica Colombiana: 2003. "Materiales Orgánicos Utilizados Como fertilizantes o Acondicionadores De suelo. Bogotá,
42. BRAVO, I. y GIRALDO, E. 2003. Manual de prácticas de química agrícola: Análisis de suelos. Departamento de Química. Universidad del Cauca.
43. POTOSÍ, S. MARQUÍNEZ, L. 2006. Fraccionamiento del Fósforo y su Correlación Con la Materia Orgánica y Otras Propiedades de Dos Suelos del Departamento del Cauca Departamento de Química. Universidad del Cauca.

44. MEDINA, F. 2004. Evaluación de la calidad y madurez de cuatro abonos orgánicos y su valoración agronómica sobre un cultivo de maíz híbrido amarillo (*Zea mays* L). Popayán Trabajo de grado (Químico). Universidad del Cauca. p. 62.
45. KIEHL, E.J. 1993. Fertilizantes Organominerais. Edi Vao do autor. .Brazil
46. BRAVO, I. GIRALDO, E. GARCES, P. 2001. Biotransformación de algunos residuos agroindustriales y evaluación de su proceso de humificación. En: Suelos Ecuatoriales, Revista de la Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo. Vol. 31, No. 2. 2001. p. 146-151.
47. BRAVO, I. GIRALDO, E. 2003. Aprovechamiento de residuos agroindustriales para uso agropecuario. En memorias del 1^{er} encuentro nacional de investigadores en aprovechamiento de desechos agroindustriales.. Santiago de Cali. p. 48-59.
48. ARANGO, G. GONZALEZ H. 1999. Sustancias Húmicas Formadas durante la compostación de residuos de cosecha. En revista de Suelos Ecuatoriales. Vol. 29 No.1. p. 32-34.
49. INBAR, Y. CHEN, Y. ANDHADAR, Y. 1990. Humic substances formed during composting of organic matter. Soio Sci. AMER. Journal. 54. p. 1316-1323.
50. SEQUI, P.NOBELI, M. LEITA, L. and CERCIGNANI, G. 1990 A new Index of Humificación. Agrochemical. 30. p.175-179.
51. SENESI, N; BRUNETTI, G. 1992. Chemical and physico-chemical parameters for quality evaluation of humic substances produced during composting. The science of Composting. European commission International Symposium. Blackie Academic & Professional. London. y Bruneti .
52. PRIMAVESI, A. 1982. Manejo Ecológico del Suelo, 5 Edición Ateneo Costa Rica, p.95 111.

10. OTRAS REFERENCIAS CONSULTADAS

1. AZEEZ, W. VAN AVERBEKE BIORESOURCE 2010. Technology. Available online 3 April J.O.
2. ZHONGQI HE, GURPAL S. TOOR, C. WAYNE HONEYCUTT, J. THOMAS SIMS. 2006. Bioresource Technology, Volume 97, Issue 14, September, Pages 1660-1668
3. PARKINSON, R. P. GIBBS, S. BURCHETT, T. 2004. Misselbrook Bioresource Technology, Volume 91, Issue 2, January, Pages 171-178
4. LUGO-OSPINA A., THANH H. DAO, J.A. VAN KESSEL, J.B. REEVES. 2005. III Environmental Pollution, Volume 135, Issue 1, May, Pages 155-162
5. THANH H. DAO, ROBERT C. SCHWARTZ. 2010. Bioresource Technology, Volume 101, Issue 10, May, Pages 3567-3574
6. A. HALAJNIA, G.H. HAGHNIA, A. FOTOVAT, R. KHORASANI. 2009. Geoderma, Volume 150, Issues 1-2, 15 April, p. 209-213
7. W.P. WEISS, D.J. 2004. Wyatt Journal of Dairy Science, Volume 87, Issue 7, July, Pages 2158-2166
8. R. W. MCDOWELL, A. N. SHARPLEY. 2001. The Science of The Total Environment, Volume 278, Issues 1-3, 20 October, Pages 113-125
9. MOHANTY, NARENDRA KUMAR PAIKARAY, A. RAJA RAJAN. 2006. Geoderma, Volume 133, Issues 3-4, August, Pages 225-230 Sangeeta
10. RICHARD W. MCDOWELL, ANDREW N. 2001. Sharpley Chemosphere, Volume 45, Issues 6-7, November, p. 737-748
11. JINGDONG MAO, DAN C. OLK, XIAOWEN FANG, ZHONGQI HE, KLAUS SCHMIDT-ROHR. 2008. Geoderma, Volume 146, Issues 1-2, 31 July, p. 353-362
12. MONDINI, C. R. CHIUMENTI, F. DA BORSO, L. LEITA, M. DE NOBILI BIORESOURCE Technology, 1996. Volume 55, Issue 3, March, p. 243-249
13. E.K. LHADI, H. TAZI, M. AYLAL, P.L. GENEVINI, F. ADANI BIORESOURCE 2006. Technology, Volume 97, Issue 16, November, Pages 2117-2123
14. G.F. HUANG, Q.T. WU, J.W.C. WONG, B.B. NAGAR. 2006. Bioresource Technology, Volume 97, Issue 15, October, p. 1834-1842

15. HANNA X. Q. LU, J. V., W. D. JOHNSON. 2001. Chemical Geology, Volume 177, Issues 3-4, 30 July, Pages 249-264
16. CHANG S.W. CHIEN, M.C. WANG, C.C. Huang Chemosphere, Volume 64, Issue 8, August 2006, Pages 1353-1361
17. DAVID A. LAIRD, MARK A. CHAPPELL, DEAN A. MARTENS, ROBERT L. WERSHAW, Geoderma, 2008. Volume 143, Issues 1-2, 15 January, p. 115-122
18. FLAIG W. THOMPSON M. 1992. Science of The Total Environment, Volumes 117-118, 30 May, Pages 561-567
19. WILKE, B. -M.. GATTINGER, A E. FRÖHLICH, L. ZELLES, P. GONG. 2004. Soil Biology and Biochemistry, Volume 36, Issue 4, April, Pages 725-729