

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA

LA MOLINA

FACULTAD DE AGRONOMÍA



**“VELOCIDAD DE MINERALIZACIÓN DEL NITRÓGENO
DE FUENTES ORGÁNICAS DERIVADAS DE LA
PRODUCCIÓN AVÍCOLA”**

TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE:

INGENIERO AGRÓNOMO

RAID DAVID PLASENCIA MEDINA

LIMA-PERÚ

2022

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA

FACULTAD DE AGRONOMÍA

**“VELOCIDAD DE MINERALIZACIÓN DEL NITRÓGENO DE
FUENTES ORGÁNICAS DERIVADAS DE LA PRODUCCIÓN
AVÍCOLA”**

RAID DAVID PLASENCIA MEDINA

Tesis para optar el Título de:

INGENIERO AGRÓNOMO

Sustentada y Aprobada ante el siguiente jurado:

Dr. Oscar Oswaldo Loli Figueroa
PRESIDENTE

Dr. Sady Javier García Bendezú
ASESOR

Ing. José Alfredo Palacios Vallejo
MIEMBRO

Ing. Mg. Sc. Ruby Antonieta Vega Ravello
MIEMBRO

LIMA – PERÚ

2022

DEDICATORIA

En el presente trabajo de investigación lo dedicamos principalmente a Dios, por ser mi inspirador celestial, fortaleza mía y darme fuerza para continuar en este proceso de obtener uno de los anhelos más deseados.

A mis padres Romulo Plasencia Obando y Marina Medina Ordoñez, por su amor, paciencia y sacrificio todos estos años, han permitido cumplir hoy un sueño más, son mi soporte, mi luz y la bendición más grande que Dios me ha dado.

A mi hermana Inés por estar presente, acompañarme y su ayuda incondicional a lo largo de esta etapa de mi vida.

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Nacional Agraria La Molina, que siempre contribuye a la investigación y desarrollo de la agricultura en nuestro país.

Al Laboratorio e Invernadero de Fertilidad del Suelo (LIFS) de la Universidad Nacional Agraria La Molina, especialmente al Dr. Guillermo Aguirre Yato (†), y al Sr. Mario Jiménez personal del invernadero; gracias por su apoyo incondicional.

Al Laboratorio de Análisis de Suelos, Plantas, Agua y Fertilizantes (LASPAF-UNALM) por su apoyo en los análisis químicos del presente trabajo.

Al Programa Nacional de Innovación para la Competitividad y Productividad (Innovate Perú) y a la empresa Avícola San Fernando S.A., por el soporte financiero de la presente investigación mediante el proyecto: Desarrollo de fertilizantes peletizados y/o granulados órganos- minerales nutricionalmente óptimos para cultivos orgánicos emergentes (cacao, café, banano y palto). Contrato 250-PNICEP-ITAI-2015– Innovate Perú.

Al Dr. Sady García Bendejú, patrocinador de la tesis, por darme la oportunidad y confianza de poder realizar esta investigación, gracias también por sus constantes consejos que se quedarán en mi mente y en mi corazón, para ser un profesional digno de sus enseñanzas.

A los miembros del jurado, especialmente a la Ing. Mg.Sc. Ruby Vega Ravello por ser parte de este trabajo de investigación.

A mis amigos de la Facultad de Agronomía, en especial a Luz, Jazmín, Marco y Juan, gracias por su amistad, escucharme en los momentos de inseguridad y por ser parte de mi etapa universitaria como también parte de este logro.

A mi check Carmen, por todo el apoyo incondicional y emocional que me daba durante el desarrollo de mi tesis.

A todas las personas de los diferentes laboratorios que me ayudaron con la realización de mis análisis y los buenos consejos y recomendaciones que me proporcionaban.

ÍNDICE GENERAL

I.	INTRODUCCIÓN	1
II.	REVISIÓN DE LITERATURA.....	3
2.1.	El cultivo de maíz amarillo	3
2.2.	Materia orgánica	4
2.3.	Materia orgánica y nitrógeno en el suelo	6
2.4.	Materias orgánicas avícolas.....	7
2.4.1.	Sistema de flotación por aire disuelto (DAF).....	7
2.4.2.	Guano de ponedoras.....	7
2.4.3.	Harina de plumas	8
2.4.4.	Harina de sangre	9
2.5.	Biología del suelo	9
2.6.	Respiración del suelo	10
2.7.	Nitrógeno y fósforo en el sistema suelo y planta.....	12
2.7.1.	Nitrógeno orgánico del suelo	14
2.7.2.	Nitrógeno inorgánico del suelo	14
2.7.3.	Ciclo del nitrógeno	15
2.7.4.	Mineralización e inmovilización	16
2.7.5.	Amonificación y nitrificación	17
2.7.6.	Fijación y volatilización del amonio.....	18
2.7.7.	Desnitrificación y lixiviación del nitrato	19
III.	METODOLOGÍA	21
3.1.	Ubicación del experimento.....	21
3.2.	Suelo experimental	21
3.3.	Agua de riego	21
3.4.	Cultivo indicador	22
3.5.	Fuentes de nitrógeno orgánico.....	22
3.5.1.	Harina de sangre	23
3.5.2.	Lodo de flotación por aire disuelto (DAF).....	23
3.5.3.	Formulaciones	23
3.6.	Tratamientos estudiados.....	24
3.7.	Materiales	26
3.7.1.	Materiales de invernadero	26
3.7.2.	Materiales de laboratorio.....	26

3.8.	Metodología.....	28
3.8.1.	Preparación del suelo y muestras de materia orgánica	28
3.8.2.	Instalación de prueba de incubación en jarras	28
3.8.3.	Determinación de la tasa de respiración	28
3.8.4.	Prueba de nitrato (NO_3^-) y amonio (NH_4^+)	29
3.8.5.	Instalación del experimento en macetas.....	30
3.8.6.	Evaluación de parámetros biométricos	31
3.8.7.	Determinación del contenido de nitrógeno en materia seca (ppm)	32
3.8.8.	Determinación de propiedades en el suelo	32
3.9.	Eficiencia de uso del nitrógeno	32
3.9.1.	Eficiencia agronómica	32
3.9.2.	Eficiencia fisiológica	33
3.9.3.	Recuperación aparente de nitrógeno.....	33
3.10.	Diseño experimental.....	33
3.11.	Tratamiento estadístico.....	34
IV.	RESULTADOS Y DISCUSIONES	35
4.1.	Resultados	35
4.1.1.	Calidad de datos.....	35
4.1.2.	Mineralización de nitrógeno.....	36
4.1.3.	Tasa de respiración	41
4.1.4.	Cuantificación de la biomasa	45
4.1.5.	Determinación de la eficiencia de uso de nitrógeno	49
4.2.	Discusión de resultados.....	52
4.2.1.	Calidad de datos.....	52
4.2.2.	Mineralización de nitrógeno.....	52
4.2.3.	Tasa de respiración	57
4.2.4.	Cuantificación de la biomasa	58
4.2.5.	Determinación de la eficiencia de uso de nitrógeno	59
V.	CONCLUSIONES	62
VI.	RECOMENDACIONES	63
VII.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	64
VIII.	ANEXOS.....	71

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Grupos químicos más importantes en el material originario de la materia orgánica del suelo.....	5
Tabla 2: Composición media del guano de gallina ponedora y harina de plumas	9
Tabla 3: Características fisicoquímicas del suelo experimental.....	22
Tabla 4: Composición porcentual de insumos orgánicos empleados en cuatro mezclas formuladas para la elaboración de abonos orgánicos	23
Tabla 5: Características de los residuos avícolas y formulaciones ensayadas	25
Tabla 6: Tratamientos aplicados en el primer experimento	26
Tabla 7: Cantidad de residuo orgánico aplicado a las macetas y jarras en gramos	31
Tabla 8: Distribución de grados de libertad, suma de cuadrados y cuadrado medio por fuente de variación.....	34
Tabla 9: Pruebas de normalidad y de homogeneidad de varianzas de los parámetros	35
Tabla 10: Efecto de los tratamientos en la concentración del nitrógeno mineralizado de la última evaluación.....	38
Tabla 11: Efecto de los tratamientos sobre el carbono respirado del suelo	44
Tabla 12: Efecto de los tratamientos sobre la altura de planta y peso seco de raíz	49
Tabla 13: Efecto de la aplicación de las fuentes orgánicas sobre el peso seco, el contenido de nitrógeno y la extracción total de nitrógeno por el follaje de plantas de maíz	51
Tabla 14: Determinación de las eficiencias agronómica, fisiológica y aparente de recuperación del nitrógeno	51

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Ciclo del nitrógeno en el suelo (adaptado de: Nicolardot et al., 1997).....	15
Figura 2. Proceso de mineralización-inmovilización (adaptado de: Brady y Weil, 2008) ..	17
Figura 3. Proceso de nitrificación (adaptado de: Brady y Weil, 2008).....	18
Figura 4. Desnitrificación (Adaptado de: Navarro y Navarro, 2003)	20
Figura 5: Determinación de la velocidad de mineralización de fuentes orgánicas en laboratorio: a) prueba de incubación en jarras; b) determinación de la tasa de respiración; c) muestreo de suelo para extracción d) extracción y filtrado; e) reacción de desarrollo de color; f) Tubos listos para la lectura de nitrato en el espectrómetro.....	30
Figura 6: Concentración de nitrógeno durante las evaluaciones: a) nitrato acumulado; b) nitrato neto; c) nitrógeno mineral acumulado; d) nitrógeno mineral neto	37
Figura 7: Concentración de nitrógeno durante las evaluaciones: a) amonio acumulado; b) amonio neto	38
Figura 8: Comportamiento del pH de los tratamientos desde la segunda evaluación hasta la sexta evaluación.....	39
Figura 9: Evolución temporal de la mineralización de nitrógeno: a) harina de sangre; b) lodo de flotación por aire disuelto; c) formulación 1; d) formulación 2; e) formulación 3; f) formulación 4.....	41
Figura 10: Evolución temporal de la respiración neta: a) harina de sangre; b) lodo de flotación por aire disuelto; c) formulación 1; d) formulación 2; e) formulación 3; f) formulación 4.....	43
Figura 11. Respiración neta en el día 90 de la evaluación	44
Figura 12. Altura de la planta en el día 90 de la evaluación	45
Figura 13. Altura de planta en la evaluación final	46
Figura 14: Medición de altura de todos los tratamientos	46
Figura 15. Boxplot de altura de planta para el día 90 de evaluación.....	47
Figura 16. Peso seco del follaje para el día 90 de la última evaluación.....	47
Figura 17. Boxplot del peso seco del follaje a los 90 días de evaluación	48
Figura 18. Peso seco de la raíz de la planta.....	48
Figura 19. Boxplot del peso seco de la raíz de la planta al día 90 de la evaluación	49
Figura 20. Grafica de la extracción de nitrógeno (g/maceta) que analizó en el laboratorio	50
Figura 21. Efecto de dos residuos orgánicos, cuatro abonos formulados y de la fertilización.....	52

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1: Curvas de calibración de nitrato y amonio.....	71
Anexo 2. Tabla de datos de parámetros en planta de maíz medidos al final de la investigación.....	72
Anexo 3. Tabla de datos N-nítrico acumulado, evaluado cada 15 días	73
Anexo 4. Tabla de datos de N-amoniacal acumulado, evaluado cada 15 días	74
Anexo 5. Tabla de datos de N-Mineral acumulado (N-nítrico + N-amoniacal).....	75
Anexo 6. Tabla de datos de N-Nítrico neto.....	76
Anexo 7. Tabla de datos de N-Amoniactal neto.....	77
Anexo 8. Tabla de datos de N-Mineral neto	78
Anexo 9. Tabla de datos de respiración del suelo (mg C kg ⁻¹ de suelo)	79
Anexo 10. Tabla de datos totales del porcentaje de N en follaje y N extraído (g/maceta) ..	80
Anexo 11. Tabla de datos de pH, evaluado cada 15 días	81
Anexo 12. Resultados de gramos de N extraído y % de N extraído.....	82
Anexo 13: Prueba de Tukey para amonio acumulado al día 90 de la evaluación	83
Anexo 14: Prueba de Tukey para amonio neto al día 90 de la evaluación	84
Anexo 15: Prueba de Kruskal-wallis para nitrato acumulado al día 90 de la evaluación....	85
Anexo 16: Prueba de Kruskal-wallis para nitrógeno mineral acumulado al día 90 de la evaluación.....	86
Anexo 17: Prueba de Kruskal-wallis para nitrato neto al día 90 de la evaluación.....	87
Anexo 18: Prueba de Kruskal-wallis para nitrógeno mineral neto al día 90 de la evaluación.....	88
Anexo 19: Prueba de Tukey para respiración neta al día 90 de la evaluación	89
Anexo 20: Determinación de la eficiencia de uso de nitrógeno	90
Anexo 21: Prueba de Tukey para altura de planta al día 90 de la evaluación.....	92
Anexo 22: Prueba de Tukey para peso seco del follaje al día 90 de la evaluación	93
Anexo 23: Prueba de Tukey para peso seco de raíz al día 90 de la evaluación	94
Anexo 24: Preparación de reactivos para la prueba de nitrato (NO ₃ ⁻).....	95
Anexo 25: Preparación de reactivos para la prueba de amonio (NH ₄ ⁺).....	96

RESUMEN

La producción avícola es fuente importante de residuos orgánicos ricos en nitrógeno. El aprovechamiento de los residuos en la agricultura depende de la disponibilidad del nitrógeno que contienen. En el presente trabajo de investigación, se evaluó la velocidad de mineralización de nitrógeno de dos residuos avícolas: harina de sangre y lodo de flotación (DAF), y de cuatro formulaciones orgánicas: F1 (60 % guano de gallina y 40 % de harina de pluma), F2 (60 % guano de gallina y 40 % harina de sangre), F3 (50 % guano de gallina, 20 % harina de sangre y 30 % cadáveres de pollo) y F4 (50 % guano de gallina, 10 % harina de sangre y 40 % DAF), bajo condiciones de laboratorio e invernadero. Las fuentes fueron incubadas en jarras de plástico con 0.5 kg de suelo a dosis de 500 mg N kg⁻¹ de suelo. Un tratamiento de fertilización inorgánica NPK (200-160-200 mg kg⁻¹) y testigo sin fertilización fueron añadidos. La producción de nitrato, amonio y la tasa respiratoria de suelo fueron medidos cada 15 días hasta 90 días después de la instalación. Los mismos tratamientos fueron aplicados a macetas conteniendo 3.0 kg de suelo, en las que se sembró maíz híbrido PM 212 como cultivo indicador. La altura de planta, los pesos secos de la parte aérea y de raíces y la extracción de nitrógeno de la parte aérea, fueron determinados y las eficiencias agronómicas, fisiológica y de recuperación aparente de nitrógeno fueron calculadas al término del experimento. En ambos ensayos se empleó un suelo ácido proveniente de la provincia de Jauja (Junín), y se utilizó un diseño completamente al azar (DCA) con cuatro repeticiones. La formulación 3 mostró la mayor velocidad de mineralización de nitrógeno y la formulación 4, la mayor evolución de CO₂. Los tratamientos no afectaron la altura de plantas de maíz, pero las formulaciones 1 y 3 superaron a los otros tratamientos en el peso seco de follaje. La fertilización inorgánica resultó en el mayor peso seco de raíz y la mayor eficiencia agronómica de nitrógeno. La harina de sangre incrementó el contenido de nitrógeno en el follaje y mostró alta eficiencia de recuperación, pero su eficiencia agronómica fue baja. La formulación 3 alcanzó la mayor eficiencia fisiológica, superando a la fertilización inorgánica. Se concluye que las formulaciones 1 y 3, son fuentes promisorias de nitrógeno disponible para las plantas.

Palabras clave: residuos avícolas, nitrógeno orgánico, mineralización.

ABSTRACT

Poultry production is an important source of nitrogen-rich organic residues. The use potential of those residues in agriculture depends on their nitrogen availability. In this work, the rate of nitrogen mineralization in two poultry residues: blood meal and dissolved air flotation slurry (DAF), and four organic formulations: F1 (60% layer manure and 40% feather meal), F2 (60% layer manure and 40% blood meal), F3 (50% layer manure, 20% blood meal and 30% broiler corpses) and F4 (50% layer manure, 10% blood meal and 40% DAF), were evaluated under laboratory and greenhouse conditions. All organic sources were incubated in plastic jars containing 0.5 kg of air-dried soil, at a dose of 500 mg N kg⁻¹ of soil. A treatment with inorganic NPK fertilization (200-160-200 mg kg⁻¹) and an unfertilized control, were added. The production of nitrate, ammonium, and y respiration rate, were measured each 15 days up to 90 days after installation. The same treatments were applied to plastic pots containing 3.0 kg of soil. PM 212 hybrid corn seeds were planted in each pot as test crop. Plant size, dry matter production of shoots and roots, and nitrogen uptake by shoots, were measured at harvest; and the nitrogen agronomic efficiency, physiological efficiency and apparent recovery, were calculated. An acidic soil from Jauja (Junín), and a completely randomized design (CRD) with four replicates, were used in both experiments. Organic formulation 3 showed the highest nitrogen mineralization rate, and formulation 4, the highest CO₂ evolving. The treatments did not affect plant size, but both formulations 1 and 3 exceeded the other treatments in shoots dry matter production. Inorganic fertilization resulted in the highest dry weight of roots and in the highest nitrogen agronomic efficiency. Blood meal increased nitrogen content in shoots and showed the highest apparent recovery efficiency, but a very low agronomic efficiency. Formulation 3 showed the highest physiological efficiency, exceeding inorganic fertilization. It can be concluded that both, formulations 1 and 3, are promising sources of available nitrogen for crops.

Keywords: poultry residues, organic nitrogen, mineralization

I. INTRODUCCIÓN

La materia orgánica es uno de los factores fundamentales de la fertilidad de los suelos. Es el reservorio de alrededor del 95 por ciento del nitrógeno edáfico e influye favorablemente sobre propiedades físicas como la estabilidad de la estructura, la erodabilidad y la densidad aparente. La materia orgánica del suelo es uno de los componentes principales de la sustentabilidad de los agroecosistemas (Swift y Woomer como se citó en Cruz, 2019).

La producción avícola es fuente importante de residuos orgánicos. Durante el 2018, la producción de aves a nivel nacional fue de 766 millones (La República, 2019). Si se asume una producción diaria de estiércol en las gallinas ponedoras de 120 g día^{-1} , en los pollos de carne de 80 g día^{-1} , en los pavos de entre $200\text{-}350 \text{ g día}^{-1}$ y en los patos 150 g día^{-1} (Michael, s.f.) se puede estimar un volumen de 28 Mt anuales de estiércol. Otros desechos de la industria avícola (sangre, plumas, cadáveres, vísceras, etc.), pueden incrementar este volumen. Estos residuos representan una fuente potencial de contaminación del medio ambiente.

La disposición y tratamiento de los residuos orgánicos puede incrementar los costos de producción de las empresas avícolas, sin embargo, su alto contenido de nutrientes los convierte en insumos de interés para su aplicación directa en agricultura o para la elaboración de abonos orgánicos. El uso de los estiércoles animales para incrementar las cosechas ha sido practicado desde tiempos inmemoriales. Los antiguos griegos y romanos los empleaban para mejorar la producción de alimentos. Los abonos orgánicos son empleados desde entonces para lograr una mejora física y química del suelo a largo plazo.

Los residuos orgánicos son valorados en función de su contenido de nutrientes, especialmente de nitrógeno. Su uso requiere asimismo evaluar la velocidad de mineralización del nitrógeno a fin de estimar su disponibilidad para las plantas.

La aptitud de los residuos orgánicos avícolas como fuentes de nitrógeno para las plantas depende de su riqueza y de su velocidad de mineralización. Debido a su alto contenido de nitrógeno orgánico, es posible inferir que los residuos avícolas son adecuados para la elaboración de abonos orgánicos con alta capacidad de proveer nitrógeno mineral. La evaluación de su aptitud agrícola requiere sin embargo la determinación de su velocidad de mineralización, es por ello que se planteó la presente investigación, a nivel de laboratorio e invernadero, con los siguientes objetivos:

1.1. Objetivo general

- Evaluar la factibilidad del uso de seis abonos orgánicos formulados a partir de residuos avícolas como fuentes de nitrógeno disponible para las plantas en un suelo de la sierra del Perú bajo condiciones de invernadero

1.2. Objetivos específicos

- Determinar la velocidad de mineralización de seis abonos orgánicos, mediante la formación de fracciones inorgánicas de nitrógeno (nitrato y amonio) y la tasa de respiración.
- Evaluar el efecto de la aplicación de los abonos orgánicos sobre la producción de biomasa de plantas de maíz, en comparación a una dosis de fertilización inorgánica.
- Determinar la disponibilidad de nitrógeno mineralizado de las fuentes orgánicas, mediante la extracción de nitrógeno por la planta de maíz.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. El cultivo de maíz amarillo

La planta se desenvuelve bien en la mayoría de los suelos, requiriendo preferentemente suelos neutros y pudiendo desarrollarse en suelos con pH 5.5 a 7.5; sensible a suelos ácidos con toxicidad de aluminio mayor al 60 % y a una baja disponibilidad de fósforo. El suelo debe estar perfectamente bien aireado y drenado, porque el cultivo es susceptible al encharcamiento. En el Perú el 90 % del área sembrada de maíz se realiza bajo secano en terrenos con topografía ondulada y con pendientes mayores al 15 %, para la siembra se realiza mayormente una quema de bosque altos y quema de purmas bajas (Hidalgo, 2013).

El nitrógeno (N) es uno de los elementos esenciales más limitantes para obtener altos rendimientos en el maíz y otros cultivos. Los estudios indican que una adecuada aplicación de nitrógeno en el suelo dará como resultado un incremento del rendimiento de grano, y también en el contenido de proteínas en los tejidos (Ibrahim & Hala, 2007).

Jacob Von Uexküll, (como se citó en De la Cruz, 2016) menciona que la fertilización del cultivo maíz con cantidades excesivas de nitrógeno estimula un crecimiento excesivo de la parte vegetativa, estimulando así la síntesis de proteínas, a tal grado, que los carbohidratos son usados en la formación de proteínas; mientras que la formación de tejidos de soporte mecánico es insuficiente, predisponiendo las plantas al tumbado y reduciendo su resistencia a condiciones adversas de tiempo y enfermedades.

El cultivo de maíz tiene un rendimiento promedio de seis toneladas de grano, extrayendo del suelo 160 kg de N, 75 kg de fósforo y 130 kg de potasio, considerándose uno de los cultivos agotantes del suelo; por lo tanto, una inadecuada fertilización en nitrógeno ocasiona una deficiencia que se está presente durante todo el ciclo vegetativo de la planta, las mazorcas tenderían a salir puntiagudas por falta de formación o llenado de granos hasta la mitad superior de la mazorca. La deficiencia de nitrógeno también se puede apreciar en un lento

crecimiento inicial, un color verde amarillento en las hojas y la prematura senescencia de las hojas más bajas, las hojas basales se deben al quebrantamiento de la clorofila, usualmente se inicia en las puntas de las hojas y luego progresa a lo largo de ellas, las proteínas de las hojas más bajas son hidrolizadas y el nitrógeno solubilizado migra hacia los centros activos de crecimiento, por lo tanto las hojas más viejas son las primeras en mostrar los síntomas, los cuales se extienden progresivamente hacia las hojas más jóvenes de la planta. La deficiencia de nitrógeno en maíz se observa a partir de los cuarenta días de la siembra, por la presencia de plantas poco vigorosas con hojas inferiores amarillentas o cloróticas; El maíz PM 212 es un híbrido doble producido por el Programa Cooperativo de Investigaciones de la Universidad Nacional Agraria la Molina, adaptado a siembras de invierno teniendo un periodo vegetativo de 160 a 180 días, con una altura de planta de 2.85 m, con una mazorca grande de 14 a 16 hileras (Beingolea *et al.*, 1993).

2.2. Materia orgánica

La materia orgánica en el suelo está formada por sustancias húmicas que se generan de animales y plantas muertas. Siempre contiene carbono (C), oxígeno (O) e hidrogeno (H) y además varios elementos inorgánicos nitrógeno (N), fósforo (P), potasio (K) y otros más. La materia orgánica puede almacenar gran cantidad de agua y atraer 10 veces más nutrientes que los minerales de la arcilla. La tasa de descomposición de la materia orgánica es alta en suelo tropical y subtropical debido a la alta temperatura (Dalzell y Biddlestone, 1991).

Los residuos de origen vegetal bajo condiciones naturales aportan anualmente al suelo una gran cantidad residuos orgánicos y los residuos de origen animal como los cadáveres y las deyecciones tienden a evolucionar muy rápido y no dejan compuestos duraderos en el suelo considerándose fuentes secundarias de materia orgánica; también los restos de los microorganismos, especialmente bacterias y hongos, dejan sustancias nitrogenadas del protoplasma celular de los microorganismos, una gran parte de esta sustancia nitrogenada pueden ser del humus. Las condiciones climáticas, temperatura y humedad ejercen una influencia dominante en la velocidad y descomposición de la materia orgánica, descomponiéndose rápidamente en climas cálidos ya que en climas fríos por cada 10 °C de disminución la materia orgánica tiende a aumentar de dos a tres veces más su contenido total y en condiciones de humedad, la materia orgánica aumenta a medida que la humedad efectiva se hace mayor.

Dentro del proceso de conversión química y bioquímica de los restos animales y vegetales en el suelo son transformados por los microorganismos vegetales y animales, estos restos no tienen la misma rapidez de descomposición o también cuando las condiciones del medio son propicias (clima, y tipo de suelo) la velocidad de descomposición depende de la naturaleza química del que lo integran (Tabla 1) el almidón, celulosa, hemicelulosa y proteína sencillas son fácilmente degradados, dando primero compuestos intermedios y finalmente productos simples: CO₂, H₂O, NH₃, etc. Otros permanecen inalterados (Navarro y Navarro, 2003).

Tabla 1: Grupos químicos más importantes en el material originario de la materia orgánica del suelo

Grupo	Componentes
Hidratos de carbono	Monosacáridos: pentosas, hexosas; Oligosacáridos: sacarosa, maltosa; polisacáridos: arabanos, poliuronidos.
Ligninas	Polímeros derivados del fenilpropano
Taninos	Complejos fenólicos
Glucósidos	Compuestos glucosa + alcohol, fenol o aldehídos
Ácidos orgánicos, sales y ésteres	Ácidos oxálico, cítrico, málico, etc.
Lípidos y afines	Grasas aceites: Esteres glicéricos. Ceras: Esteres no glicéricos Aceites esenciales: Derivados del terpeno
Resinas	Ácidos resínicos Proteínas, aminoácidos, aminas y bases orgánicas
Compuestos nitrogenados	Alcaloides Purinas, pirimidinas, ácidos nucleicos
Pigmentos	Clorofilas, carotenoides, antocianinas
Compuestos minerales	Aniones y cationes

Fuente: Navarro y Navarro, 2003

Entre los procesos químicos de importancia por parte de la materia orgánica se da el suministro de elementos nutritivos por parte de la mineralización; como la liberación de nitrógeno, fósforo, azufre y micronutrientes disponibles para la planta; la estabilización de la acidez del suelo por su poder de amortiguador; la capacidad de intercambio catiónico muy importante para suelos arenosos, regularización de los niveles de disponibilidad de nutrientes

principales y elementos menores ya que contienen ácidos orgánicos (quelatos) que influyen en la solubilización y movilización de los componentes inorgánicos; inactivación de plaguicidas, etc. (Fassbender y Bornemisza, 1987).

2.3. Materia orgánica y nitrógeno en el suelo

En la mayoría de los suelos presenta un contenido de materia orgánica entre 1 % a 6 %. En suelos muy áridos el contenido se encuentra menos a 1 %, en selvas tropicales, donde tienden a depositarse muchos desechos orgánicos pueden estar por encima del 6 %; el humus representa el 10 al 15 % de la materia orgánica, siendo de naturaleza coloidal (Gostincar, 2007).

Salazar et al. (2003), reportaron que aproximadamente el 35 % del nitrógeno aplicado a la planta de maíz fue absorbido por la planta, el 40 % fue inmovilizado y el resto, lixiviado. En la misma investigación se encontró la mayor concentración de amonio en el suelo justo después de la aplicación del fertilizante.

Chapman (1979), menciona que el contenido de nitrógeno en la materia seca vegetal esta alrededor del 0.4 a 4 %, señalando que la variación en la concentración está en función de varios factores tales como: especie de planta, variedad y/o cultivar, órgano y edad de la planta. Mengel y Kirkby (1987) sostienen que “el contenido de nitrógeno en la materia seca de las plantas va del 2 a 4 %, siendo baja en comparación al carbono que es el orden del 40 %” (p. 363). Navarro y Navarro (2003) menciona “el amonio cambiante y el contenido en la disolución suelo, juntos con las formas de nitrato y nitrito, constituyen, menos del 2 % del nitrógeno total en el suelo”. (p. 185)

Un suelo con un contenido de materia orgánica mayor del 4 % puede ser clasificado como un suelo altamente húmico. El contenido de N total en los suelos presenta un amplio ámbito, pero es común el comprendido entre 0.2 y 0.7 % para la denominada capa arable. El porcentaje tiende a disminuir al aumentar la profundidad del perfil. Dentro de los factores de formación del suelo, el clima es el que influye más directamente en el contenido total del N, cuyo porcentaje tiende a incrementarse al disminuir la temperatura y al aumentar la precipitación, dentro de ciertos límites (Fassbender y Bornemisza, 1987).

2.4. Materias orgánicas avícolas

Kovda (como se citó en Gandarilla, 1988) menciona que un número muy amplio de productos orgánicos pueden ser probados, analizados y mezclados para su utilización como abonos orgánicos, en conformidad con el clima, el tipo de suelos, la variedad de cultivos y su concentración. (p. 11)

Myers (como se citó en Gandarilla, 1988) menciona que la humedad y la temperatura son dos factores ecológicos que están muy relacionados con las pérdidas y ganancias de nitrógeno del suelo al adicionarle sustancias orgánicas. (p. 15)

Reddy *et al.* (1982) menciona que un aumento en la humedad y la temperatura hasta ciertos límites, en condiciones de abundante sustrato favorecerá los procesos de amonificación y de nitrificación, aunque no en la misma medida, lo cual podría entonces provocar pérdidas de nitrógeno en forma gaseosa o por lixiviación estiman que estas pérdidas podrán ser mayores en los suelos arenosos que en los arcillosos, por el mayor efecto de retención de las arcillas y su gran capacidad de cambio.

2.4.1. Sistema de flotación por aire disuelto (DAF)

Los mataderos de aves producen gran cantidad de aguas residuales, caracterizadas por presentar altas concentraciones de materia orgánica biodegradable, materia coloidal y suspendida, tales como grasas, proteínas y celulosa. Las aguas residuales de mataderos (ARM) son altamente contaminantes debido a su elevada demanda bioquímica de oxígeno (DBO), por lo que provocan un alto impacto ambiental en cuerpos receptores. Si estas aguas residuales no son tratadas contribuyen a la degradación de los medios acuáticos. La eficiencia de los sistemas de tratamiento como el pretratamiento en sistemas de flotación por aire disuelto (DAF, han sido evaluados por varios investigadores, demostrando que remueven más del 80 % de la demanda química de oxígeno (DQO) presente en estas aguas (Caldera *et al.*, 2010).

2.4.2. Guano de ponedoras

Maisonnave *et al.* (2019) nos dice en su investigación que las muestras de guano de gallina analizadas (Tabla 2) tuvieron un contenido promedio de nitrógeno total (NT) de 3.20 % (nitrógeno orgánico (N-org) 1.49 % y de nitrógeno amoniacal (N-NH₄⁺) 1.71 %). La composición media del guano de gallina respecto de P y K fue de 1.77 y 2.69 %

respectivamente. Estos resultados se encuentran dentro de los rangos esperados y determinan una relación aproximada NPK de: 1.8N: 1P: 1.5K, esta proporción de macronutrientes esenciales es similar a la calculada en base a diversas publicaciones de EEUU específicas para guano de gallina en galpones con manejo seco del mismo: 1.5N: 1P: 1K.

El análisis de la composición de cationes principales como el calcio, sodio, magnesio y potasio, muestra que el calcio es el catión mayoritario con el 14.52 % y el sodio es el catión en menor concentración y representa tan sólo el 0.57 % de las bases. El zinc es un micronutriente esencial para el desarrollo de las plantas, las excretas de aves son normalmente ricas en zinc, la concentración media de zinc fue de 262.3 mg kg⁻¹. Otro micronutriente esencial para las plantas es el cobre el contenido medio de guano de gallina del presente estudio arrojó un valor de 38.2 mg kg⁻¹ de guano. Según publicaciones internacionales consultadas, se ubicó entre 15 y 68 mg kg⁻¹ de guano, y entre 150 y 388 mg kg⁻¹ de guano en el caso del zinc.

2.4.3. Harina de plumas

Las plumas presentan 80.5 % de proteínas, 10.0 % de fibra orgánica, 93 % materia orgánica y 12.7 % de nitrógeno, lo convierte en excelente sustrato para la preparación de bioabonos, ya que hasta un 30 % de plumas muestran mejoras significativas en la capacidad de retención de agua, materia orgánica, nitrógeno y el contenido mineral, parámetros importantes en la calidad de bioabonos. Además, la utilización en preparación de compost incrementa hasta 4.8 % de nitrógeno. Las plumas son fuente de péptidos, aminoácidos y minerales para los fertilizantes orgánicos, la degradación y aplicación en suelos podría ser una fuente de compuestos nitrogenados para las plantas y generar aminoácidos, especialmente el triptófano, un precursor de la hormona del crecimiento de las plantas, ácido indol-3-acético (IAA) fitohormona esencial para la germinación de semillas y desarrollo de las plantas, incluida la plasticidad celular, elongación del tejido, embriogénesis y emergencia de las raíces colaterales. Es decir, se observa una mejora integral del cultivo.

También, se ha evidenciado que su aplicación en la agricultura orgánica funciona como fertilizante de liberación semi lenta; la liberación de nitrógeno llega hasta 65 % después de ocho semanas, en parte a su resistencia a la descomposición, la acumulación de biomasa microbiana y la descomposición secundaria. Su aplicación en los suelos presenta afectos muy importantes en los indicadores de fertilidad, produciendo efectos significativos en el

pH, MO N, P y K y sobre la población de bacterias hidrolizantes de celulosa y las proteolíticas, favoreciendo el reciclaje que está directamente relacionada con la fertilidad y el control de enfermedades (Florida, 2019).

2.4.4. Harina de sangre

Con las preocupaciones actuales con respecto a la sangre de los beneficios de los animales, las posibilidades de la propagación de ciertas enfermedades, las industrias o mataderos deben encontrar usos alternativos para la sangre. El uso de productos para el beneficio de la agricultura como el compostaje, se está volviendo más y más popular como un método de eliminación de ganado muerto, parece razonable suponer que se puede utilizar para el tratamiento de la sangre (Fleming & Macalpine, 2005).

Tabla 2: Composición media del guano de gallina ponedora y harina de plumas

Características	Gallina ponedora	Harina de plumas	Harina de sangre
N-NH4 (%)	1.71	-	-
N-orgánico (%)	1.49	-	-
N total (%)	3.2	12.7	13
Fosforo (%)	1.77	0.55	2
Potasio (%)	2.69	0.14	-
Calcio (%)	14.5	0.55	0.5
Sodio (%)	0.57	0.22	-
Magnesio (%)	0.73	0.12	-
Zinc (ppm)	262.3	-	-
Cobre (ppm)	38.2	-	-

Fuente: Maisonnave *et al.*, 2019 y Florida, 2019

2.5. Biología del suelo

El suelo es generalmente un hábitat favorable para la proliferación de microorganismos y donde se desarrollan micro colonias y se encuentra de 10^8 a 10^{10} bacterias por gramo de suelo. los microorganismos aislados del suelo comprenden virus, bacterias, hongos, algas y protozoos, siendo la concentración de materia orgánica alta favorecen el desarrollo de los microorganismos heterótrofos (Atlas y Bartra, 2002).

En los suelos abundan tanto los representantes del reino animal y vegetal se encuentran desde roedores, gusanos, insectos hasta diminutas bacterias. Por ejemplo, el número de bacterias encontradas en un gramo de suelo, pueden encontrarse desde cien mil hasta varios miles de millones, según las condiciones. Las actividades de los organismos varían desde la compleja desintegración principalmente física por insectos y gusanos, hasta descomposición completa por los microorganismos (bacterias, actinobacterias y hongos), en la liberación aparece el nitrógeno, fosforo y azufre como ejemplo del proceso (Buckman & Brady, 1997).

Los nematodos, protozoos y rotíferos constituyen los micro animales del suelo, están centrada en el ataque de plantas (nematodos) o degradación de materia orgánica (protozoos y rotíferos). Las algas constituyen un grupo no muy grande, algunas pueden fijar el nitrógeno atmosférico. Los hongos juegan un papel importante, tienen la capacidad de degradar compuestos altamente resistentes del suelo (lignina, celulosa, etc.) considerados muy importantes en la formación de humus, aunque no pueden oxidar el NH_4^+ a NO_3^- , ni tampoco fijar nitrógeno atmosférico como lo hacen las bacterias, pero si tienen gran capacidad de descomposición. Los actinomicetos ocupan un lugar intermedio entre hongos y bacterias, son bastantes numerosos en suelos ricos de humus, son de gran importancia en relación con la degradación de materia orgánica y liberación de nutriente, reducen a formas sencillas incluso a la lignina. Las bacterias seres unicelulares (4 - 5 μm) con formas variables (redondas, bacilares o espiraladas), se multiplican en dos partes rápidamente en condiciones favorables, la mayor proporción se encuentra en los horizontes superficiales, en un gramo de suelo existen de tres a cuatro billones y en una hectárea de la capa arable del suelo existe en peso vivo entre 450 y 560 kg de tejido bacterias, pueden ser autótrofas y heterótrofas, las autótrofas obtienen su energía de la oxidación de NH_4^+ , S y Fe y la mayor parte de su carbono de CO_2 , las heterótrofas obtienen su energía de la materia orgánica del suelo; su temperatura optima esta entre los 21 y 38 °C, requiriendo también una alta concentración de calcio (pH=6 - 8), participan en todas las transformaciones vitales del suelo y son fundamentales para la nitrificación, oxidación del azufre y fijación del nitrógeno atmosférico; si fallan estos procesos se alteraría rápidamente la vida de las plantas superiores (Navarro y Navarro, 2003).

2.6. Respiración del suelo

El pH del suelo varía entre dos en suelos ácidos a nueve en suelos alcalinos, Sin embargo, Boyd et al. (2002) indica que el rango óptimo de pH para la descomposición bacteriana se encuentra entre pH 7-8. Sin embargo, cada especie de microorganismos presenta un pH óptimo para su funcionamiento metabólico; las tasas de respiración en climas cálidos son mayores y varían con el pH del suelo, contenido de humedad, suplemento de O₂ y disponibilidad de N. Además, son mayores cerca de la superficie del suelo, debido a altas concentraciones de MO y a la disponibilidad de oxígeno. La respiración aeróbica requiere de una continua presencia de oxígeno, en suelos anegados el oxígeno atmosférico no puede penetrar en el suelo prontamente y la tasa de respiración aeróbica declina, originándose la respiración anaeróbica, la descomposición anaeróbica de sustratos orgánicos, generalmente es reducida y menos completa que la descomposición aeróbica.

Krebs (2003) nos dice que en su trabajo de investigación el dióxido de carbono (CO₂) contenido en el flujo de aire no se retiene completamente por el filtro alcalino, la falla del filtro alcalino pudo estar asociado a la concentración alcalina y/o al flujo de aire. El uso del filtro alcalino en la determinación de la respiración puede generar una sobreestimación del resultado debido a la incompleta absorción de CO₂ y también la concentración de NaOH determina la magnitud del error experimental por efecto de la titulación y manipuleo de la muestra.

Linn & Doran (1984), dice que los suelos anegados tienen por lo general una menor tasa de respiración debido a que el agua ocupa los espacios porosos y el oxígeno atmosférico no puede penetrar rápidamente. Un exceso de agua por otro lado puede afectar el transporte y difusión de oxígeno hacia el interior de las partículas de suelo, creando condiciones anaeróbicas y reduciendo la respiración aeróbica.

Woods (como se citó en Hinostroza *et al.*, 2013) menciona que el CO₂ de la rizosfera proviene de un tercio de la respiración de las raíces y dos tercios de la respiración de los microorganismos. La producción de CO₂ es afectado por la temperatura, humedad, aireación y pH del suelo. A nivel de la rizosfera se encuentra una concentración de 20.6 % de oxígeno, menos de 0.2 % de CO₂ y 79 % de nitrógeno, el porcentaje de CO₂ en la atmósfera es de sólo 0.03 %, es decir siete veces menos. En suelos compactos puede haber más de 10 % de CO₂

en la rizosfera. Sin embargo, contenidos mayores de 5 % de CO₂ y/o < 10 % de oxígeno afectan el crecimiento de los cultivos agrícolas.

Hinostroza *et al.* (2013). menciona que los rangos usuales de respiración se encuentran entre 10 – 100 kg CO₂ ha⁻¹día⁻¹, pero la mayoría de los suelos se encuentran en el rango 25 – 40 kg CO₂ ha⁻¹día⁻¹. (p. 19)

2.7. Nitrógeno y fósforo en el sistema suelo y planta

El nitrógeno forma parte de toda célula viva, la mayor cantidad de nitrógeno en los suelos se encuentra en forma orgánica, aproximadamente el 98 %. El nitrógeno de la materia orgánica (MO) proviene de la atmósfera, vía plantas y microorganismos que al ser descompuestos han dejado compuestos orgánicos resistentes y semirresistentes en el suelo durante su desarrollo, una gran parte del nitrógeno estará sujeto a varias conversiones por los microorganismos y finalmente algo retornará a la forma NO₃⁻. Además, bajo condiciones anaerobias los NO₃⁻ pueden ser reducidos a óxidos y finalmente a N₂ (Bonadeo *et al.*, 2017).

Santos (como se citó en Tarigo *et al.*, 2004) menciona que las plantas subnutridas presentan mayores tenores de materia seca, a causa de un menor crecimiento resultando hojas más chicas y espesas. Mientras que la aplicación de fertilizantes minerales, principalmente nitrógeno reduce la cantidad de materia seca por simple acumulación de agua en los tejidos

El fósforo interviene en muchas de las reacciones que utilizan energía dentro de la célula ya que forma parte integral de las moléculas que acumulan energía como el adenosín trifosfato (ATP) y se forman como resultado de la fotosíntesis, utilizadas en la respiración de la planta. También es un elemento vital importancia para la generación de células nuevas y por lo tanto para la producción de raíces al inicio de los ciclos vegetativos. (Fernández, 2007).

Llanos (como se citó en Castro, 2018) menciona que el maíz absorbe la mayor parte del nitrógeno en forma nítrica (NO₃⁻), si bien cuando la planta es joven las raíces pueden tomar del suelo más rápidamente las formas amoniacales del nitrógeno (NH₄⁺) que las nítricas, al final del ciclo la proporción de nitrógeno absorbido en forma nítrica llega a ser un 90 % del total extraído del suelo.

Gros (como se citó en Castro, 2018) menciona que la planta absorbe el nitrógeno en estado nítrico, cuando en realidad esto no es absolutamente exacto, ya que la planta puede también

absorber directamente el nitrógeno amoniacal del suelo sin previa nitrificación. En la primera fase de su vida, las plantas muestran preferencia por el nitrógeno amoniacal, que utilizan más rápidamente que el nítrico en los procesos de síntesis de proteínas; la acción de los abonos amoniacales es más progresiva y duradera que la de los nitratos, debido a que la nitrificación, aun siendo rápida se prolonga durante un determinado tiempo. Los abonos amoniacales son bien retenidos por el poder absorbente del suelo a pesar de su solubilidad, en cambio los abonos nítricos son muy solubles, rápidamente asimilables por la planta y no son retenidos por el poder absorbente del suelo.

La mayoría de los cultivos agrícolas absorben el nitrógeno como ion NO_3^- ; sin embargo, estudios recientes han demostrado que los cultivos usan cantidades apreciables de NH_4^+ , unas de las razones por las que se obtiene rendimientos más altos con la absorción de una parte del N como NH_4^+ , es que la reducción de NO_3^- , dentro de la planta requiere de energía (NO_3^- es reducido a NH_4^+ que luego forma parte de los aminoácidos). Esta energía es proporcionada por carbohidratos, los mismos que podrían ser usados para el crecimiento o para la formación del fruto (Andrade *et al.*, 1996).

Mengel y Kirkby (como se citó en Castillo, 2014) menciona que la diferencia entre la absorción de ambas formas se debe principalmente a su sensibilidad al pH; La mejor absorción de NH_4^+ tiene lugar en un medio neutro y se deprime cuando se disminuye el pH, pero lo contrario sucede para la absorción del NO_3^- , ocurriendo una absorción más rápida a valores bajos de pH, esto se debe al efecto competitivo de los iones OH^- que suprimen el sistema de transporte de la absorción del NO_3^- .

McNeill & Unkovich (2007) mencionan también que la planta toma los iones NH_4^+ y NO_3^- en función de la concentración de estos en la solución de suelo, el patrón de distribución radical, el contenido de agua del suelo y la tasa de crecimiento de la planta. Estos iones pueden alcanzar la superficie de la raíz por flujo de ion masa con el agua del suelo, por difusión, por extensión o por interceptación; sin embargo, el NH_4^+ es más fácilmente adsorbido por los sitios de intercambio catiónico del suelo que el NO_3^- , su flujo de masa y difusión en la solución de suelo es más bajo; algunas plantas y pueden mostrar preferencia por la absorción del NH_4^+ o del NO_3^- . Se ha referenciado que el NH_4^+ , una vez es absorbido por la planta, se incorpora rápidamente en forma de aminoácidos para evitar toxicidad. El NO_3^- en cambio, generalmente no es tóxico para las plantas. Este puede ser transportado

hasta los meristemos de crecimiento antes de su asimilación, almacenado en vacuolas para su posterior reducción o en algunos casos utilizado para ajuste osmótico.

2.7.1. Nitrógeno orgánico del suelo

Van y Reeves (como se citó en Elizondo, 2006) menciona que el nitrógeno en el suelo se encuentra en forma orgánica con 95 % o más del nitrógeno total presente. El nitrógeno orgánico debe ser primero mineralizado (convertido a nitrógeno inorgánico) antes de que las plantas lo puedan utilizar. La cantidad de nitrógeno orgánico que se mineralizará el primer año del nitrógeno orgánico será multiplicada por un factor de mineralización que oscila entre 0.25 y 0.35.

Bonadeo *et al.* (2017) menciona que una importante cantidad del nitrógeno de la MO se encuentra como grupos aminos (NH_2). Los compuestos orgánicos que contienen nitrógeno son principalmente aminoácidos y hexosaminas. El nitrógeno orgánico puede ser dividido en una fracción fácilmente mineralizable y en otra estable, la primera es usualmente menos de un tercio del nitrógeno orgánico total de los suelos. La segunda fracción está también presente mayoritariamente como complejos arcillo - húmicos, los cuales son resistentes a la descomposición.

2.7.2. Nitrógeno inorgánico del suelo

El primer producto resultante de la descomposición de la materia orgánica (mineralización) es el NH_4^+ , proveniente de la descomposición de proteínas, aminoácidos y otros compuestos. Las tres formas inorgánicas más importantes, NH_4^+ , NO_2^- y NO_3^- representan generalmente del 2 al 5 % del N total del suelo. La fuente de NH_4^+ proviene de la mineralización del nitrógeno orgánico y de los fertilizantes (Fassbender y Bornemisza, 1987).

El nitrógeno inorgánico se encuentra en los suelos principalmente como NO_3^- y como NH_4^+ . En algunos suelos de pH elevado se pueden encontrar pequeñas cantidades de nitrito (NO_2^-). El nitrógeno orgánico puede ser transformado a nitrógeno inorgánico por descomposición microbiana de material vegetal. Cuando se incorpora a los suelos nitrógeno inorgánico, una parte de este es transformado a formas orgánicas, el cual puede ser, más tarde, transformado a formas inorgánicas. Si se agrega al suelo NH_4^+ o es liberado desde la MO por mineralización, rápidamente es convertido a NO_3^- , la nitrificación es inhibida por pH bajos y condiciones anaerobias (Bonadeo *et al.*, 2017).

2.7.3. Ciclo del nitrógeno

Perdomo et al., (2007) mencionan que los distintos procesos de pérdida y ganancia de nitrógeno del sistema actúan en forma simultánea en el suelo, y se relacionan con el ciclo de mineralización e inmovilización (CMI) del nitrógeno, es afectada por las condiciones de clima. La complejidad de estas reacciones, interaccionando entre sí y con el medio ambiente, es difícil predecir la cantidad de nitrógeno mineral presente en el suelo y disponible para las plantas. Si se agrega nitrógeno a un suelo que tiene una gran cantidad de rastrojo con alta relación C/N, como en el caso de restos de maíz o sorgo, gran parte del NH_4^+ producido será inmovilizado por los microorganismos, y por lo tanto poco de este N mineral estará sujeto a pérdidas, pero también será poco el nitrógeno disponible para el crecimiento vegetal. En cambio, si el nitrógeno fue agregado a un suelo con poco rastrojo o con un rastrojo con baja relación C/N, gran parte del nitrógeno mineral será nitrificado, y estará disponible para la absorción temprana del cultivo, pero también estará sujeto a pérdidas, como lavado o desnitrificación.

Los diferentes estados de oxidación comprenden desde la carga -3 a +5, que va desde el NH_4^+ o NH_3 hasta el NO_3^- compuesto mayormente asimilable por las plantas, Follett (como se citó en Elizondo, 2006) menciona que las formas inorgánicas de nitrógeno presentes en el suelo incluyen amonio (NH_4^+), amoníaco (NH_3), nitrógeno elemental (N_2), óxido nitroso (N_2O), óxido nítrico (NO), nitrito (NO_2^-) y nitrato (NO_3^-). (p.71)

El ciclaje del nitrógeno en los agroecosistemas terrestres es supremamente complejo, las entradas de nitrógeno en un agroecosistema comprenden los procesos de fijación biológica o industrial de nitrógeno elemental (N_2) y la deposición de nitrógeno por parte de materias orgánicas e inorgánicas en el suelo (deposiciones) (McNeill & Unkovich, 2007).

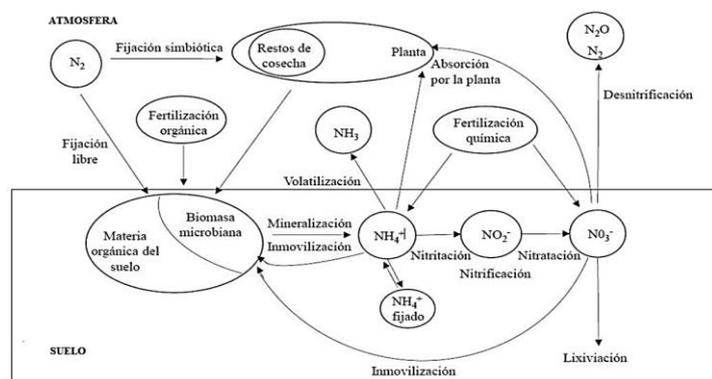


Figura 1. Ciclo del nitrógeno en el suelo (adaptado de: Nicolardot et al., 1997)

2.7.4. Mineralización e inmovilización

“La inmovilización del nitrógeno consiste en la incorporación del NO_3^- o del NH_4^+ , a la biomasa vegetal o microbiana. Es un proceso inverso a la mineralización, ya que el nitrógeno inorgánico se transforma en nitrógeno orgánico, Villalobos *et al.* (como se citó en Gordillo, 2010)” (p. 29).

Las reacciones que ocurren en el proceso de mineralización se puede observar las reacciones ocurridas en la figura 2, Vale (como se citó en Berrocal, 2016) menciona que la primera etapa del proceso de mineralización es la amonificación (conversión del nitrógeno orgánico a amonio) bajo la acción de microorganismos heterótrofos que utilizan sustratos de carbono como fuente de energía y compuestos orgánicos del tipo aminoácidos y nucleótidos como sustrato alimenticio. Posteriormente continúa el proceso de nitrificación que consiste en la oxidación del amonio (NH_4^+) a nitrato (NO_3^-) por la acción de bacterias autótrofas y que ocurre en condiciones de buena aireación y a pH próximo a la neutralidad.

Los autores sugieren que la relación C/N de las enmiendas orgánicas influye en su tasa de mineralización, ya que un aumento en esta relación indicaría que existe mayor disponibilidad de carbono para el desarrollo de microorganismos amonificadores que actúan en el proceso de mineralización, por ende, se consumirían el nitrógeno disponible, inmovilizándolo y reduciendo de esta manera la mineralización neta, Azeez y Van v; Abbasi *et al* (como se citó en Cardona, 2017).

La mineralización del nitrógeno de la materia orgánica es posible gracias a los microorganismos del suelo que, al satisfacer sus necesidades energéticas y nutricionales con la materia orgánica, asimilan una parte del nitrógeno y la otra parte la botan como desecho, convirtiéndolo en nitrógeno aprovechable por la planta. Esta se realiza en tres fases: aminización, amonificación y nitrificación (Gordillo, 2010).

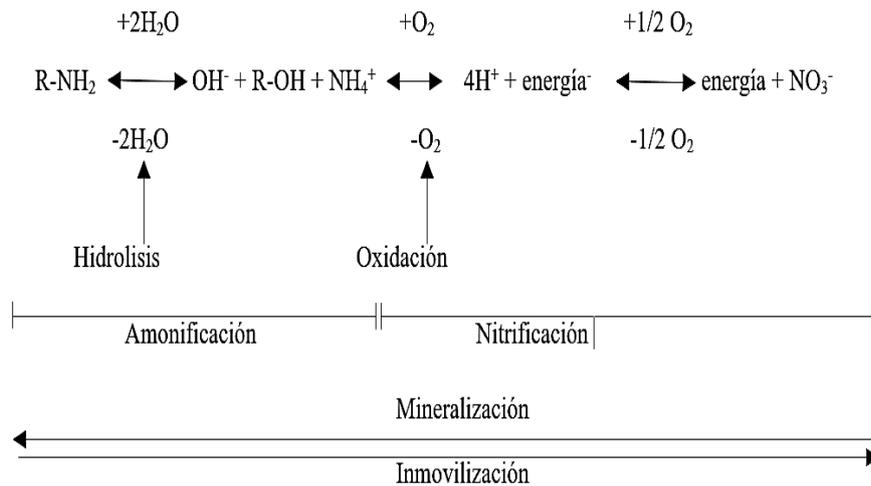


Figura 2. Proceso de mineralización-inmovilización (adaptado de: Brady y Weil, 2008)

Stanford & Schwaninger (como se citó en Oropeza, 2018) menciona que la mineralización del nitrógeno aumenta con el incremento de la temperatura en un rango de 0 - 35 °C y cesa la actividad microbiana a temperaturas próximas al punto de congelación. Con temperaturas por encima de 35 °C la amonificación continúa, pero la nitrificación cesa a temperaturas superiores a 45 °C. Gordillo y Cabrera (como se citó en Oropeza, 2018) menciona que el pH influye en la forma química del nitrógeno presente en el suelo; por consecuencia la probabilidad de pérdidas por volatilización en forma de amoníaco (NH₃) aumenta con el pH, disminuyendo la cantidad de nitrógeno que se puede mineralizar. Por otro lado, el pH también influye sobre la actividad microbiana desarrollándose mejor los microorganismos responsables de la mineralización en condiciones ácidas.

2.7.5. Amonificación y nitrificación

La amonificación es un proceso enzimático, llevado a cabo por microorganismos heterótrofos, en el que el nitrógeno de las aminas y aminoácidos de las sustancias orgánicas son transformadas y liberada compuestos amónicos. En este proceso los microorganismos son muy variados tanto aeróbicos como anaeróbicos; las bacterias de los géneros *Pseudomonas*, *Proteus*, *Bacillus* y *Bacterium*, parecen ser microorganismos amonificantes. Las sustancias nitrogenadas orgánicas y están asociadas a tejidos vegetales, estos residuos vegetales deben tener una relación C/N inferior a 20 para que pueda liberarse inmediatamente cierta cantidad de amoníaco. Cuando esta relación es superior a 30, la cantidad de amoníaco liberada será nula o escasa, a menos que siga a la descomposición (Navarro y Navarro, 2003).

Perdomo *et al.* (2007) menciona que la nitrificación se define como el pasaje de NH_4^+ a NO_3^- , el cual es realizado por un grupo reducido de microorganismos autótrofos especializados (principalmente nitrobacterias), que obtienen su energía de este proceso oxidativo; el amonio (NH_4^+) a pasa a óxido nitroso (NO_2^-), en donde intervienen bacterias del género *Nitrosomonas*, después el óxido nitroso (NO_2^-) es convertido a nitrato (NO_3^-) por bacterias del género *Nitrobacter*, el paso de NO_2^- a NO_3^- es más rápida que la de NH_4^+ a NO_2^- y ambas de estas reacciones son mucho más rápidas que la reacción de pasaje de nitrógeno orgánico a NH_4^+ , por lo que el nitrato (NO_3^-) es acumulado en los suelos. El pase de NH_4^+ a NO_3^- se libera H^+ , por lo que la nitrificación puede acidificar los suelos; las nitrobacterias son microorganismos aerobios estrictos, por lo que en condiciones anaerobias este proceso se detiene y se acumula NH_4^+ , la temperatura óptima para la nitrificación es cercano a los 30 °C; los microorganismos tienen valores óptimos de pH entre 5.5 y 7.5 y si el pH es mayor a 7 se afecta el paso de NO_2^- a NO_3^- , el pH es superior a 8 se afecta el paso de NH_4^+ a NO_2^- ; las concentraciones de NH_4^+ superiores a 3000 mg N kg^{-1} de suelo pueden afectar el pasaje de NH_4^+ a NO_2^- (Figura 3).

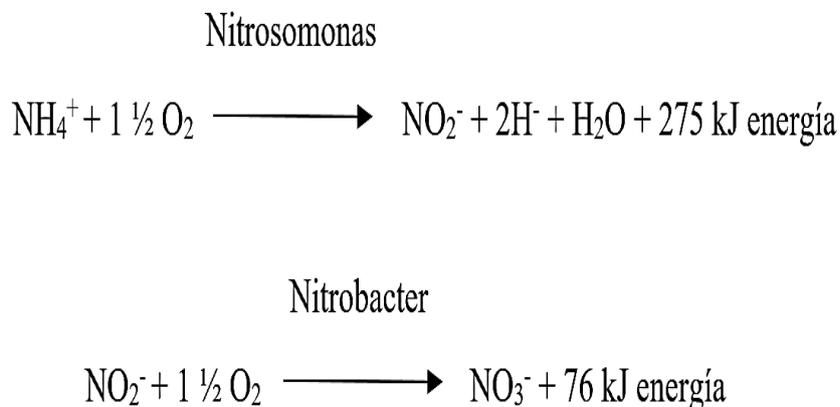


Figura 3. Proceso de nitrificación (adaptado de: Brady y Weil, 2008)

2.7.6. Fijación y volatilización del amonio

La fijación del nitrógeno se define como la oxidación o reducción del nitrógeno para dar amonio u óxidos; consiste en la conversión del nitrógeno atmosférico a formas metabolizables, que puedan ser incorporadas por los seres vivos. Estas formas son el ion amonio (NH_4^+) o los iones nitrito (NO_2^-) o nitrato (NO_3^-). la fijación de nitrógeno lo realizan algunos organismos que pueden aprovechar directamente el nitrógeno del aire a través de

bacterias, formando nódulos. Estas bacterias forman parte de la denominada rizosfera, que es una zona de interacción única y dinámica entre raíces de plantas y microorganismos del suelo. La comunidad de la rizosfera consiste en una microbiota (bacterias, hongos y algas) y una microfauna (protozoos, nematodos, insectos y ácaros). Las bacterias en simbiosis con una planta hospedante fijan el nitrógeno del aire, es decir, originan compuestos solubles por las plantas, como amoníaco, y el amoníaco entra en la cadena alimenticia mediante su incorporación a los aminoácidos y proteínas. El enlace que une los dos átomos de nitrógeno tiene un alto coste energético de rotura; para romper este triple enlace son necesarias grandes cantidades de energía y la enzima nitrogenasa es la encargada de romper dicho enlace, para lo cual necesita 16 moléculas de ATP por N_2 reducido (Calvo, 2011).

La primera forma mineral producida durante la mineralización del nitrógeno es el amoníaco (NH_3), es un gas y puede perderse de la superficie del suelo cuando se produce, por volatilización; este gas puede ser absorbido por el follaje verde de la parte aérea de la planta (canopia); la atmósfera puede estar enriquecida en (NH_3) y una cantidad significativa del mismo puede ser absorbido por suelos y lagos cercanos. La molécula de NH_3 es fuertemente polar y se combina fácilmente con protones para formar amoníaco (NH_4^+). El NH_3 es estabilizado en suelos ácidos, pero en suelos alcalinos donde la cantidad de protones disponibles es muy escasa, se incrementa la volatilización y si las condiciones de humedad son favorables (cerca de la CC), se pierde poco NH_3 por volatilización aún en suelos alcalinos (Bonadeo *et al.*, 2017).

2.7.7. Desnitrificación y lixiviación del nitrato

La transformación del nitrato es un proceso que da formas gaseosas de nitrógeno y por lo que se conoce como desnitrificación (Figura 4), el nitrato es reducido a nitrito y éste, a través de una serie de reacciones a gas óxido nítrico, gas óxido nitroso y eventualmente a gas dinitrógeno, liberándose oxígeno en el proceso. Los microorganismos responsables de la desnitrificación son especies bacterianas de los géneros *Pseudomonas*, *Micrococcus*, *Bacillus* y *Achromobacter* y autótrofas del género *Thiobacillus* y el óptimo de temperatura es de 27 – 30 °C (Navarro y Navarro, 2003).

III. METODOLOGÍA

3.1. Ubicación del experimento

La fase de invernadero de la presente investigación será conducida en el Laboratorio e Invernadero de Fertilidad del Suelo (LIFS) de la Universidad Nacional Agraria La Molina (UNALM), la cual se encuentra a 12°04'46" Latitud Sur, 76°56'45" Longitud Oeste y una altitud de 245 m.s.n.m. La fase de laboratorio será conducida en el Laboratorio de Análisis de Suelos, Plantas, Aguas y Fertilizantes (LASPAF-UNALM), ubicado a 12°05'02" Latitud Sur, 76°56'54" Longitud Oeste y una altitud de 238 m.s.n.m. El clima es templado subtropical con un promedio de temperaturas máximas y mínimas anuales de 24 y 16 °C respectivamente. La precipitación acumulada anual es 23 mm aproximadamente.

3.2. Suelo experimental

El suelo experimental fue colectado de la capa arable (30 cm) de una parcela agrícola ubicada en la provincia de Jauja, región Junín. Los resultados del análisis fisicoquímico efectuado en el LASPAF- UNALM se presentan en la Tabla 4.

3.3. Agua de riego

Para el riego de las macetas se empleó agua subterránea proveniente de un pozo distrito de Huachipa, con bajo contenido de sales solubles (conductividad eléctrica = 0.8 dS/m).

3.4. Cultivo indicador

Semillas de maíz híbrido PM 212, provenientes del Programa de Investigación y Proyección Social en Maíz de la Universidad Nacional Agraria la Molina (UNALM), fueron empleadas como cultivo indicador para los ensayos de invernadero de la presente investigación (Tabla 3).

Tabla 3: Características fisicoquímicas del suelo experimental

Característica	Unidad	Valor	Calificación
Clase textural	--	--	Franco
pH en H ₂ O (1:1)	---	5.27	Fuertemente ácido
CE (1:1)	dS m ⁻¹	0.36	No salino
CaCO ₃	%	0	No calcáreo
Materia orgánica	%	11.5	Alto
Fósforo disponible	mg kg ⁻¹	27	Alto
Potasio disponible	mg kg ⁻¹	139	Bajo
CIC	cmol _c kg ⁻¹	27.2	Alta
Ca ²⁺	cmol _c kg ⁻¹	20.7	Alto
Mg ²⁺	cmol _c kg ⁻¹	1.07	Bajo
K ⁺	cmol _c kg ⁻¹	0.26	Muy bajo
Na ⁺	cmol _c kg ⁻¹	0.1	Muy bajo
Al ³⁺ + H ⁺	cmol _c kg ⁻¹	0.1	Bajo
PSB	%	81	Moderado

Fuente: LASPAF-UNALM, 2017

3.5. Fuentes de nitrógeno orgánico

La fuente de nitrógeno que se utilizarán en este experimento será proveniente de restos orgánicos avícolas de crianza industrial con una presentación en polvo seco finamente granulado, estos abonos orgánicos serán provisto por la empresa avícola San Fernando S.A. Este es un producto orgánico no paso por ninguna descomposición posterior.

3.5.1. Harina de sangre

Procedente de la planta de beneficio de aves de la empresa en Huaral. Este residuo fue empleado luego del secado al sol y a estufa. Sólido granulado, pulverulento, de color marrón oscuro.

3.5.2. Lodo de flotación por aire disuelto (DAF)

Procedente de la laguna de tratamiento de aguas residuales de la planta de beneficio. Sólido pastoso de color negro.

3.5.3. Formulaciones

Se ensayaron cuatro abonos orgánicos experimentales elaborados con base en guanos de gallinas reproductoras y de gallinas ponedoras, enriquecidos con otros residuos avícolas. La formulación de los abonos se resume en la

Tabla 4.

Tabla 4: Composición porcentual de insumos orgánicos empleados en cuatro mezclas formuladas para la elaboración de abonos orgánicos

Insumo	Composición (%) *			
	Form. 1	Form. 2	Form. 3	Form. 4
Guano de reproductoras	30	30	25	25
Guano de ponedoras	30	30	25	25
Harina de pluma	40	---	---	---
Harina de sangre	---	40	20	10
Cadáveres de pollo de descarte	---	---	30	---
DAF	---	---	---	40
Total	100	100	100	100

Fuente: Elaboración propia de los datos de LASPAF-UNALM, 2017, datos en base al peso seco de cada insumo.

3.6. Tratamientos estudiados

En el presente experimento, las cuatro formulaciones de residuos orgánicos avícolas y los residuos orgánicos (lodo de flotación (DAF) y harina de sangre) fueron comparados a una misma dosis, con una aplicación de nitrógeno (500 mg kg^{-1} de suelo), esta dosis de residuo orgánico se halló de acuerdo con el contenido de nitrógeno de la Tabla 5 y se mezcló en jarras con 0.5 kg y macetas con 3.0 kg de suelo.

Para su comparación se realizó un tratamiento con una fertilización inorgánica de 500-160-200 mg kg^{-1} de suelo y se emplearon los siguientes fertilizantes: para la fertilización inorgánica se usó nitrato de amonio (33 % N), fosfato diamónico (18 % N, 46 % P_2O_5) y sulfato de potasio (50 % K_2O) y también se usó un tratamiento testigo sin aplicación de ninguna fuente orgánica e inorgánica, esto se usó para ver la efectividad frente a los demás tratamientos.

Tabla 5: Características de los residuos avícolas y formulaciones ensayadas

Características	Harina sangre	Lodo de flotación	Formulación 1	Formulación 2	Formulación 3	Formulación 4
pH (H ₂ O 1:1)	6.12	5.48	6.86	7.66	7.11	6.72
C.E. (dS m ⁻¹)	10.99	6.99	19.4	13.3	16.1	15.8
Humedad (% en PF)	6.82	69.90	10.17	11.22	9.28	9.52
Materia orgánica (% PS)	73.6	84.9	59.2	57.4	50.1	60.9
N (g kg ⁻¹)	138.82	61.85	65.8	60.8	49.5	71.3
P ₂ O ₅ (g kg ⁻¹)	24.6	28.4	4.3	4.3	6.7	4.5
K ₂ O (g kg ⁻¹)	8.31	1.05	29.2	23.8	24.6	25.2
CaO (g kg ⁻¹)	6.69	12.9	92.4	97.7	70.7	95.9
MgO (g kg ⁻¹)	1.8	1.7	9.4	9.1	10	9.0
Na (g kg ⁻¹)	7.0	0.85	5.0	5.1	5.0	3.9

Fuente: LASPAF-UNALM, 2017

Tabla 6: Tratamientos aplicados en el primer experimento

Tratamiento	Fuente	Descripción	Clave
T0	Ninguna	Testigo	T
T1	Orgánica	Harina de sangre de pollo	HS
T2	Orgánica	Lodo de flotación por aire disuelto (DAF)	DAF
T3	Inorgánica	Fertilización inorgánica	FI
T4	Orgánica	Formulación 1	Form 1
T5	Orgánica	Formulación 2	Form 2
T6	Orgánica	Formulación 3	Form 3
T7	Orgánica	Formulación 4	Form 4

Cada tratamiento consta de cuatro repeticiones, por lo que en total serían ocho tratamientos multiplicado por 4 repeticiones, es decir, 32 unidades experimentales

3.7. Materiales

Para cada experimento de la investigación se utilizarán:

3.7.1. Materiales de invernadero

- 32 macetas de plástico, de 4 kg de capacidad
- 36 jarras de plástico de 1 L
- Balanza
- Tamiz de 1, 2 y 5 mm
- Estufa

3.7.2. Materiales de laboratorio

Instrumento y equipos

- Agitador horizontal
- Balanza analítica con una precisión de 0.001 g
- Bureta graduada

- Colorímetro o espectrofotómetro de absorción molecular UV-VIS (Longitud de onda de 410 nm)
- Dispensador de 10 ml y 50 ml
- Fiolas de 100, 1000 y 2000 ml
- Matraces de Erlenmeyer de 125 mL
- Micropipetas (1000 μ L y 5000 μ L)
- Papel filtro Whatman N°1
- Pipeta de 10 mL
- Piseta de 1 L
- Tamiz (1 y 5 mm)
- Tubos de centrifuga 100 ml
- Tubos de ensayo

Reactivos

- Acetato de sodio Q.P. CH_3COONa
- Ácido acético glacial. CH_3COOH
- Ácido salicílico
- Cloruro de amonio Q.P. NH_4Cl
- Cloruro de bario dihidratado Q.P. $\text{BaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$
- Cloruro de potasio Q.P. KCl
- EDTA sódico
- Etanol
- Fenol Q.P. $\text{C}_6\text{H}_6\text{O}$
- Fenolftaleína
- Hidróxido de sodio Q.P. NaOH
- Nitrato de sodio Q.P. NaNO_3
- Sulfato de potasio Q.P. K_2SO_4

3.8. Metodología

3.8.1. Preparación del suelo y muestras de materia orgánica

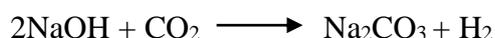
Para esta investigación el suelo recolectado en la zona de Junín fue secado al ambiente, molido y tamizado a 2 mm de diámetro. Los residuos orgánicos avícolas fueron secadas a estufa a 50 °C, molidas y tamizadas a 1 mm de diámetro.

3.8.2. Instalación de prueba de incubación en jarras

Para la prueba de incubación, porciones de 0.5 kg de suelo seco y tamizado fueron mezcladas con los residuos y abonos orgánicos en cantidad suficiente para aplicar 500 mg de N kg⁻¹ de suelo. La mezcla fue homogenizada y colocada en jarras de plástico de 1 L de capacidad. Los suelos fueron humedecidos a capacidad de campo y regados frecuentemente para mantener dicha humedad. Las jarras fueron incubadas a temperatura ambiente (17 – 23 °C) durante 90 días.

3.8.3. Determinación de la tasa de respiración

La tasa de respiración (Figura 5) de las fuentes fue determinada quincenalmente mediante el método de la captura en álcali. En cada evaluación, un vaso conteniendo 10 mL de solución de NaOH 1N fue colocado cuidadosamente dentro de cada jarra. Luego, las jarras fueron cerradas herméticamente con una bolsa de plástico y colocadas en un lugar fresco y oscuro por 24 horas, para capturar el CO₂ liberado. La captura del CO₂ producido puede explicarse mediante la reacción:



Para cuantificar el CO₂ capturada por la solución alcalina, las jarras fueron abiertas y los vasos con solución, retirados. La solución fue colocada en un matraz de Erlenmeyer y se añadió 10 ml de solución de BaCl₂, a fin de precipitar en Na₂CO₃ formado como BaCO₃, de acuerdo a la reacción:



Posteriormente, se agregó dos gotas de fenolftaleína (solución alcohólica) y el NaOH restante fue titulado con HCl 1N hasta alcanzar el viraje a incoloro de acuerdo a la reacción:



3.8.4. Prueba de nitrato (NO_3^-) y amonio (NH_4^+)

Para la determinación de la prueba de nitrato (NO_3^-), se recolectó 13 g de suelo de las jarras (suelo-enmienda) en tubos de centrifuga, a esto se agregó 20 mL del extractante K_2SO_4 0.34 M, los tubos fueron agitador por 20 minutos, después se procedió a sedimentar por 1 hora, el sobrenadante se filtró, de ese filtrado y de la curva de NO_3^- (Anexo 1) se tomó alícuotas de 0.5 mL y fue colocado en tubos de ensayo. Durante la agitación constante al tubo de ensayo en el vortex, se adicionó un 1 mL de solución de ácido salicílico y 10 mL de NaOH 4 N siendo una reacción exotérmica, por último, se dejó enfriar y se llevó al espectrofotómetro para su lectura a 410 – 420 nm.

Para la determinación de la prueba de nitrato (NH_4^+), se recolectó 2.5 g de suelo de las jarras (suelo-enmienda) en tubos de centrifuga, a esto se agregó 20 mL del extractante KCL 1 N, los tubos fueron agitador por 20 minutos, después se procedió a sedimentar por 1 hora, el sobrenadante se filtró, de ese filtrado y de la curva de NH_4^+ (Anexo 1) se tomó alícuotas de 3 mL y fue colocado en tubos de ensayo. Durante la agitación constante al tubo de ensayo en el vortex, se adicionó 4 mL de fenol básico y 10 mL de la solución de clorox, por último, se dejó reposar como máximo 1 hora y se llevó al espectrofotómetro para su lectura a 630 nm (Figura 5).



Figura 5: Determinación de la velocidad de mineralización de fuentes orgánicas en laboratorio: a) prueba de incubación en jarras; b) determinación de la tasa de respiración; c) muestreo de suelo para extracción d) extracción y filtrado; e) reacción de desarrollo de color; f) Tubos listos para la lectura de nitrato en el espectrómetro.

3.8.5. Instalación del experimento en macetas

En la siembra se pesó 3.0 kg de suelo y fue mezclado homogéneamente con el tratamiento a evaluar, Previamente, 0.5 kg de arena lavada de río fue colocado en macetas de 4.0 kg de capacidad, a manera de base y para facilitar el drenaje. Posteriormente, las macetas se completaron con mezcla homogénea de suelo y abono orgánico. Durante los primeros siete días se regó a humedad de CC y en el séptimo día fue sembrado cinco semillas de maíz híbrido PM-212 como planta indicadora, y durante los tres meses del experimento se regó de acuerdo con los requerimientos de la planta y las condiciones climáticas. Durante la

finalización del experimento se realizaba las evaluaciones según los parámetros descritos en la metodología.

Tabla 7: Cantidad de residuo orgánico aplicado a las macetas y jarras en gramos

Tratamiento	Jarras (0.5 kg de suelo)	Macetas (3.0 kg de suelo)
DAF	1.8	10.8
HS	4.04	24.24
Form 1	3.8	22.8
Form 2	4.11	24.66
Form 3	5.05	30.3
Form 4	3.51	21.06

Fuente: Elaboración propia de los datos de LASPAF-UNALM, 2017, datos en base al contenido de nitrógeno de cada insumo.

3.8.6. Evaluación de parámetros biométricos

En el presente experimento, la altura de planta será evaluada aproximadamente tres semanas antes de finalizar el experimento y el resto al finalizar experimento, aproximadamente 90 días después de la siembra (momento de la cosecha del follaje y raíz).

Altura de planta (cm)

Dos meses después de la siembra, las plantas de maíz serán medidas con una regla o cinta métrica estirando la hoja más larga para medir la altura de planta.

Peso fresco de follaje (g)

Al finalizar el experimento las plantas serán cortadas al nivel del suelo, y luego pesadas en una balanza de precisión para obtener la materia fresca o biomasa por planta.

Peso seco de follaje (g)

Porciones de la materia fresca anterior serán pesadas y secadas a estufa a 70 °C por 24 horas hasta peso constante. Posteriormente serán nuevamente pesadas obteniéndose el peso seco por planta y el porcentaje de materia seca

Peso seco de raíz (g)

Al finalizar el experimento, el suelo sobrante con la raíz dentro se tamizará para obtener solo la raíz y después se lleva a estufa por 70 °C durante 24 horas, para poder ser pesada en una balanza de precisión y obtener el peso de la materia seca.

3.8.7. Determinación del contenido de nitrógeno en materia seca (ppm)

El follaje seco será molido finamente y colocado en una bolsa rotulada para después ser llevadas al laboratorio para su respectivo análisis. El nitrógeno en el tejido seco será determinado por el método de micro-Kjeldahl.

3.8.8. Determinación de propiedades en el suelo

Estas mediciones serán evaluadas cada 15 días después de la siembra en maceta, durante 90 días que durará el experimento, realizando un total de seis evaluaciones.

pH del suelo

Cada semana se evaluará el pH con un potenciómetro en una relación 1:1 con agua destilada durante los meses que dure el experimento.

3.9. Eficiencia de uso del nitrógeno

Existen varias formas de expresar la eficiencia del nitrógeno, pero para esta evaluación y con los datos obtenidos se realizarán estas eficiencias para su mejor comprensión del uso del nitrógeno en la planta.

3.9.1. Eficiencia agronómica

Se expresa el peso seco neto de la parte cosechada del tratamiento entre el nitrógeno aplicado al principio de la evaluación con la materia orgánica.

$$EAg = (Ptr - Pte)/Nap$$

3.9.2. Eficiencia fisiológica

Se expresa el peso seco neto de la parte cosechada del tratamiento entre el nitrógeno neto absorbido.

$$EF = (Ptr - Pte)/(Ntr - Nte)$$

3.9.3. Recuperación aparente de nitrógeno

Se expresa el peso de nitrógeno absorbido neto por parte del tratamiento entre el nitrógeno aplicado al principio de la evaluación con la materia orgánica.

$$RAN = ((Ntr - Nte)/Nap))x100$$

Siendo:

Pte: Peso seco del testigo de la parte aérea

Ptr: Peso seco del tratamiento de la parte aérea

Nte: Nitrógeno extraído por el testigo

Ntr: Nitrógeno extraído por el tratamiento

3.10. Diseño experimental

Para el presente experimento se empleó un diseño completamente al azar (DCA), contando con ocho tratamientos (testigo, DAF, harina de sangre, fertilización inorgánica, formula 1, formula 2, formula 3 y formula 4) y cuatro repeticiones. Se considerará un total de 32 unidades experimentales.

El modelo aditivo lineal es el siguiente:

$$Y_{(ij)} = \mu + t_i + \epsilon_{ij}$$

Donde:

$i = 1, 2, 3, \dots, t$ (número de tratamientos)

$j = 1, 2, 3, \dots, r_i$ (número de repeticiones en el i -ésimo tratamiento)

$Y_{(ij)}$ = Valor observado de la unidad experimental j -ésimo a lo cual se aplicó el i -ésimo tratamiento.

μ = Efecto de la media general.

T_i = Efecto del i-ésimo tratamiento.

ε_{ij} = Efecto del error experimental al cual se aplicó el tratamiento i, en la repetición j.

Tabla 8: Distribución de grados de libertad, suma de cuadrados y cuadrado medio por fuente de variación.

Fuente de variación	Grados de libertad (G.L.)	Suma de cuadrados (S.C.)	Cuadrado medio (C.M.)
Tratamiento	$T - 1$	S.C. tratamientos	C.M tratamientos
Error	$T (R - 1)$	S.C. error	C.M error
Totales	$TR - 1$	S.C. total	-----

Fuente: elaboración propia.

3.11. Tratamiento estadístico

Los datos obtenidos en las determinaciones de producción de N amoniacal y nítrico, en la producción de materia seca y en la extracción de nitrógeno por las plantas de maíz, fueron tabulados y procesados sin transformar. La normalidad de la distribución de datos se determinó aplicando la prueba de Shapiro – Wilks; en tanto que la homogeneidad de varianzas, mediante la prueba de Bartlett. Los datos fueron sometidos al análisis de variancia (ANVA) y los promedios, comparados mediante la prueba de comparación HSD (diferencia honesta significativa) de Tukey con $\alpha = 0.05$. Para el análisis estadístico se empleó el paquete *Agricolae* y la interfaz R-Studio del ambiente de proceso estadístico R, versión 4.0.0 (R Core Team, 2020).

IV. RESULTADOS Y DISCUSIONES

4.1. Resultados

4.1.1. Calidad de datos

Los valores obtenidos de las variables, al aplicar la prueba de Shapiro – Wilks (normalidad) y la prueba de Bartlett (homogeneidad de varianzas), se muestran en la Tabla 9 del cual, la altura de planta, peso seco raíz, la respiración neta, N amoniacal, conductividad eléctrica y pH, cumplen con las pruebas a un nivel de significancia de 0.05.

Tabla 9: Pruebas de normalidad y de homogeneidad de varianzas de los parámetros

Parámetros	Prueba de Shapiro- Wilk (Normalidad)	Prueba de Bartlett (Homogeneidad de varianzas)
Altura de planta (cm)	0.054*	0.854*
Peso seco del follaje (g)	0.834*	0.007
Peso seco raíz (g)	0.091*	0.492*
Nitrógeno total en tejido vegetal (%)	0.011	0.002
Respiración [#] (ppm)	0.762*	0.213*
N nítrico [#] (ppm)	0.000	0.000
N amoniacal [#] (ppm)	0.321*	0.398*
N mineralizado [#] (ppm)	0.713*	0.000
Respiración ^a (ppm)	0.715*	0.200*
N nítrico ^a (ppm)	0.000	0.000
N amoniacal ^a (ppm)	0.257*	0.482*
N mineralizado ^a (ppm)	0.000	0.000
Conductividad eléctrica (ppm)	0.060*	0.061*
pH (ppm)	0.461*	0.582*

(*) Cumplen con la prueba respectiva ($p > 0,05$), # Valores acumulados al día 90 de incubación.

^a Valores netos al día 90 de incubación

4.1.2. Mineralización de nitrógeno

La mineralización del nitrógeno de la materia orgánica es posible gracias a los microorganismos del suelo que, al satisfacer sus necesidades energéticas y nutricionales, asimilan una parte del nitrógeno y la otra parte la oxidan para obtener energía. Esta se realiza en tres fases: aminización, amonificación y nitrificación (Gordillo, 2010).

Para cada fase se observó el comportamiento de la concentración neta y acumulada del compuesto, y para el caso del nitrógeno mineral se analizó la tasa de mineralización. En el análisis de la concentración acumulada solo se incluyó al tratamiento testigo. Con el fin de poder tener el verdadero efecto de los demás tratamientos ya que el testigo contaba con cierta concentración inicial del mineral.

4.1.2.1. Amonificación y nitrificación

La primera etapa del proceso de mineralización es la conversión del nitrógeno orgánico a amonio (NH_4^+), gracias a la acción de microorganismo heterótrofos que usan de la materia orgánica, carbono y aminoácidos como fuente de energía y sustrato alimenticio, respectivamente. Luego esta molécula se oxida a nitrato (NO_3^-) por acción de bacterias autótrofas en condiciones de pH neutro y buena aeración. Si se agrega al suelo NH_4^+ o es liberado desde la MO por mineralización, rápidamente es convertido a NO_3^- , la nitrificación es inhibida por pH bajos y condiciones anaerobias (Bonadeo *et al.*, 2017).

Esto quiere decir que mientras la molécula de amonio se consume, su concentración disminuye para dar paso a la formación de la molécula de nitrato, de modo que los tratamientos que tienen las concentraciones más bajas de amonio tienen los valores más altos de nitrato y nitrógeno mineral.

En el Anexo 4 y Anexo 7 el amonio acumulado y neto tiene variaciones desde -578.5 a 185 y -460.25 a 1621.5 respectivamente teniendo datos muy dispersos durante todas las evaluaciones. En el Anexo 3 y Anexo 6 el nitrato acumulado y neto tiene variaciones desde 15.15 a 46.55 y -63.74 a 101 respectivamente, teniendo evaluaciones de días menos dispersos como el día 30. En el Anexo 5 y Anexo 8 el nitrógeno mineral acumulado y neto tienen variaciones desde 28.97 a 48.38 y 20.4 a 149.67, teniendo no tanta dispersión en el nitrógeno mineral acumulado y más dispersión nitrógeno mineral neto presenta más

dispersión durante todas las evaluaciones, el día más disperso para todos fue en la tercera evaluación.

En el lado izquierdo de las Figura 6 y Figura 7 se observa que, en las concentraciones acumuladas de nitrato y N mineral, el testigo tuvo la menor concentración frente a los otros tratamientos, dado que no se le añadió ningún tipo de materia orgánica. Por otro lado, la formulación 3 obtuvo la mayor concentración de nitrato y nitrógeno mineral. En el amonio neto a partir de la tercera evaluación (día 45) los valores de las concentraciones de todos los tratamientos fueron negativas a excepción del DAF que tuvo valores positivos desde la primera evaluación (día 15) hasta la última evaluación (día 90) y la formulación 4 tuvo concentraciones negativas desde la primera evaluación (día 15) hasta la última evaluación (día 90).

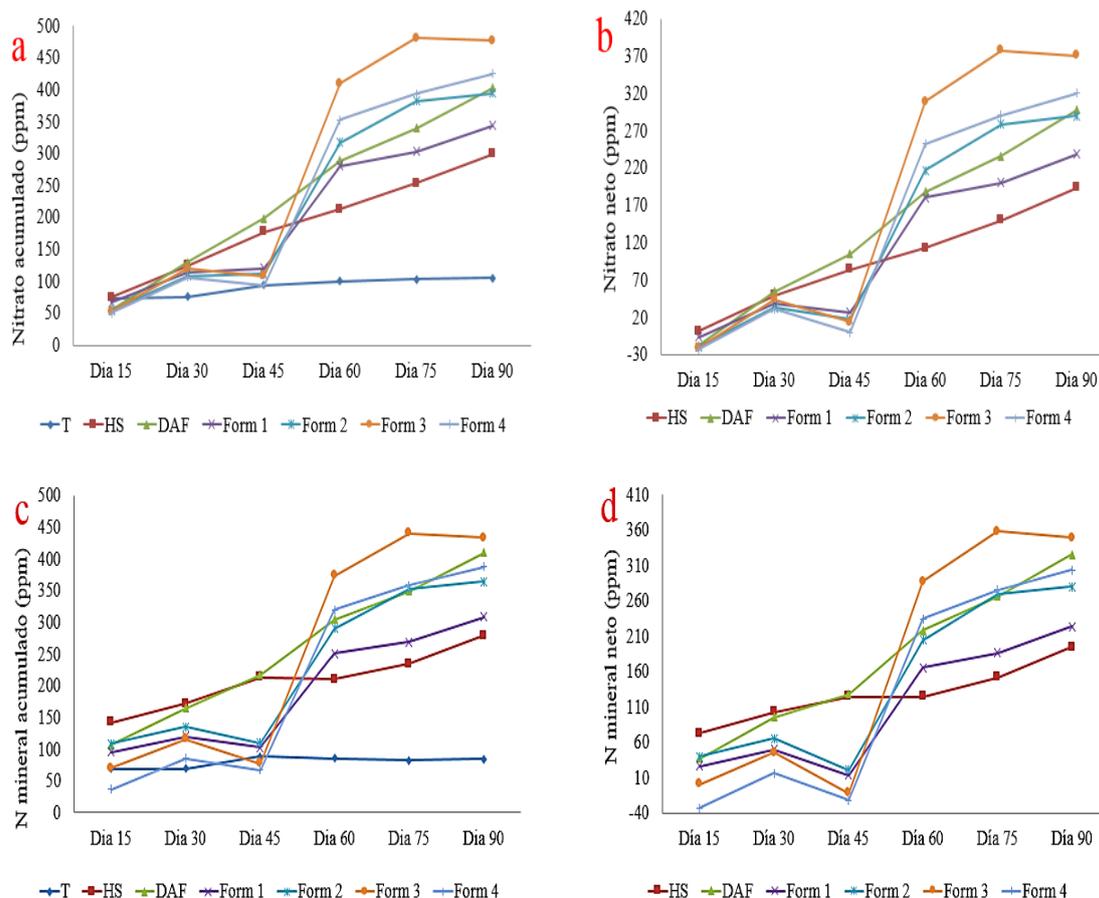


Figura 6: Concentración de nitrógeno durante las evaluaciones: a) nitrato acumulado; b) nitrato neto; c) nitrógeno mineral acumulado; d) nitrógeno mineral neto

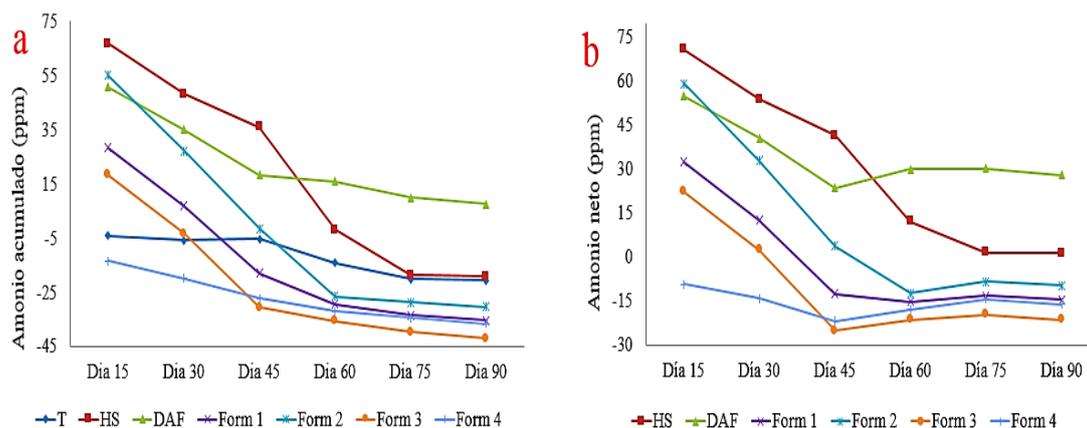


Figura 7: Concentración de nitrógeno durante las evaluaciones: a) amonio acumulado; b) amonio neto

Según la prueba de tukey a un nivel de significancia de 0.05 (Anexo 13 y Anexo 14), existen diferencias significativas entre los tratamientos de amonio acumulado y amonio neto; en el amonio acumulado en la fórmula 1 y 4 no se encuentran diferencias significativas (Tabla 10).

Tabla 10: Efecto de los tratamientos en la concentración del nitrógeno mineralizado de la última evaluación

Tratamiento	N-NH ₄ ⁺ acumulado	N-NH ₄ ⁺ neto	N-NO ₃ ⁻ acumulado	N-NO ₃ ⁻ neto	N-mineral acumulado	N-mineral neto
Testigo	-20.4 b	-	105.1 b	-	84.4 b	-
Harina de sangre	-19.2 b	1.38 b	298.4 b	193.4 b	279.2 b	194.8 b
DAF	7.5 a	28.1 a	402.2 a	297.2 a	409.7 a	325.3 a
Formulación 1	-35.3 d	-14.7 d	343.7 ab	238.6 b	308.4 ab	223.9 b
Formulación 2	-30.4 c	-9.8 c	394.4 a	289.3 a	363.0 a	279.5 a
Formulación 3	-42.0 e	-21.4 f	475.7 a	370.6 a	433.7 a	349.22 a
Formulación 4	-36.7 d	-16.1 e	424.5 a	319.4 a	387.8 a	304.4 a
p-valor	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001
Significación	***	***	***	***	***	***

*Medias seguidas de la misma letra en la columna, no difieren estadísticamente según la prueba estadística respectiva al 5 % de significancia

Para el nitrato acumulado y N nitrato neto, según la prueba de Kruskal – Wallis a un nivel de significancia del 0.05 (Anexo 15 y Anexo 17), existen diferencias significativas entre la

Form3-HS, Form3-T, Form4-HS, Form4-T, no existe diferencias significativas entre Form3-Form 4-DAF-Form 2-Form 1 y entre la Form 1-HS del nitrato acumulado (Tabla 10); y para el nitrógeno mineral acumulado y neto (Anexo 16 y Anexo 18) Con la misma prueba, se tienen diferencias significativas de la misma forma que el N mineral neto y acumulado (Tabla 10).

Las reacciones que se dan dentro de la fase de nitrificación se producen dentro de un amplio intervalo de pH de 4.5 a 10 del cual 8.5 es el valor óptimo para una producción mayor (Gordillo Rivero, 2010). Según las mediciones de pH que se hicieron durante el experimento, los valores estuvieron entre un rango de 4.5 – 5.5 lo cual está dentro de lo normal, pero no llega al valor óptimo. Aun así, este factor podría ser un detonante en la reacción ya que a partir del día 60, las formulaciones 3 y 4 que tuvieron mayor concentración de N mineral, fueron los que tuvieron mayor pH (Figura 8).

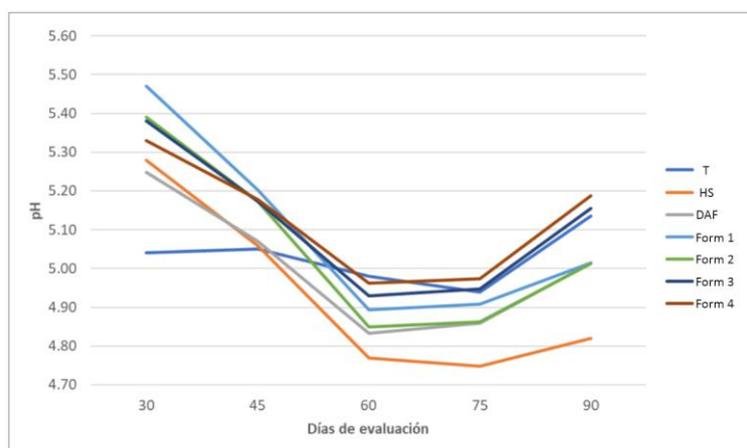


Figura 8: Comportamiento del pH de los tratamientos desde la segunda evaluación hasta la sexta evaluación

Durante las primeras semanas se observa que la concentración de nitrógeno mineral aumenta de forma moderada siendo la harina de sangre la que tuvo mayor concentración de nitrógeno durante las tres primeras evaluaciones (100 ppm) debido a que la sangre de residuos avícolas tiene en su composición agua, sales y proteínas que facilitan la actividad microbiana. A partir de la sexta semana comienza a haber un incremento significativo en el cual la formulación 3 supera a todos los demás tratamientos debido a que el nitrógeno orgánico ya se encuentra en partículas más fáciles de realizar el proceso de mineralización.

La relación C/N de las enmiendas orgánicas influye en su tasa de mineralización, Azeez y Van Averbeke; Abbasi *et al* (como se citó en Cardona, 2017). Según Gordillo (2010), la mineralización del nitrógeno depende de la resistencia que ofrecen los compuestos nitrogenados a la actividad de los enzimas proporcionados por la población microbiana edáfica.

4.1.2.2. Tasa de mineralización

La tasa de mineralización de nitrógeno es la velocidad con la que se libera N por cada unidad de tiempo específica, es decir, el porcentaje de N que queda en forma disponible en un tiempo determinado (Cerrato *et al.*, 2007). Para el caso de la presente investigación, se calculó la tasa de mineralización en base a los días de evaluación que fueron cada 15 días. Para este análisis, se ajustaron todos los datos a un modelo logarítmico de la forma:

$$y=a*\ln(x)+b,$$

De acuerdo con este ajuste, se tiene en la Figura 9, que el tratamiento con mayor tasa de mineralización fue la formulación 3, el cual se obtuvo aproximadamente 223.18 ppm de nitrógeno mineral cada quince días. Esta tasa de mineralización de residuos avícolas fue menor a la tasa de mineralización de conejaza (1183 ppm cada semana), compost de rosas (572 ppm cada semana) y porquinaza (543 ppm cada semana), según los resultados obtenidos en la investigación de Figueroa-Barrera *et al.* (2012), quien también aplicó el modelo logarítmico para el análisis de tasa de mineralización.

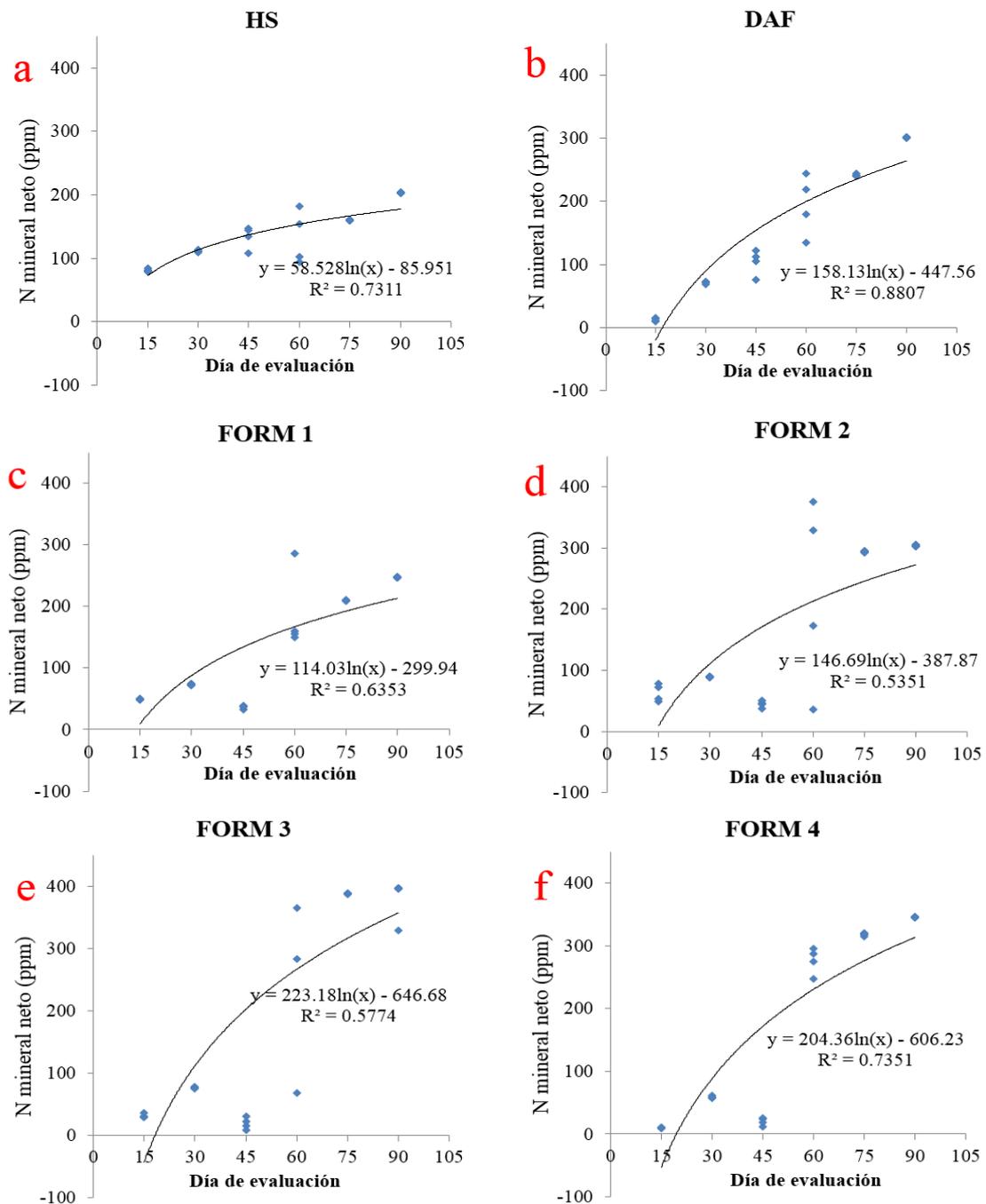


Figura 9: Evolución temporal de la mineralización de nitrógeno: a) harina de sangre; b) lodo de flotación por aire disuelto; c) formulación 1; d) formulación 2; e) formulación 3; f) formulación 4

4.1.3. Tasa de respiración

La tasa de respiración es la velocidad con el que los microorganismos consumen oxígeno mientras degradan la materia orgánica. Si la materia orgánica tiene más carbono, mayor será el tiempo de su degradación y por tanto habrá mayor actividad de los microorganismos en cuanto al consumo de oxígeno (mayor tasa de respiración). Según Gordillo (2010), el

descenso del carbono en el suelo hace descender la población microbiana y parte del nitrógeno contenido en su biomasa vuelve a incorporarse al proceso de mineralización. La respiración efectuada por los microorganismos hace que se pierdan aproximadamente dos tercios del C como CO₂, y el tercio restante es inmovilizado por los mismos microorganismos para formar más tejido microbiano (Perdomo et al., 2007).

La tasa de respiración se calculó en base a los resultados de la evaluación quincenal del experimento. Los datos se ajustaron a un modelo logarítmico de la forma:

$$y=a*\ln(x)+b,$$

De acuerdo con este ajuste, se tiene en la Figura 10: que el tratamiento con mayor tasa de respiración fue la formulación 4, en el cual se obtuvo aproximadamente 192.95 ppm de nitrógeno mineral por cada quince días. Sin embargo, los modelos de la formulación 3 y 4, fueron los únicos que tuvieron un grado de ajuste R² mayor a 0.80, lo que significa que las ecuaciones pueden usarse para predicción.

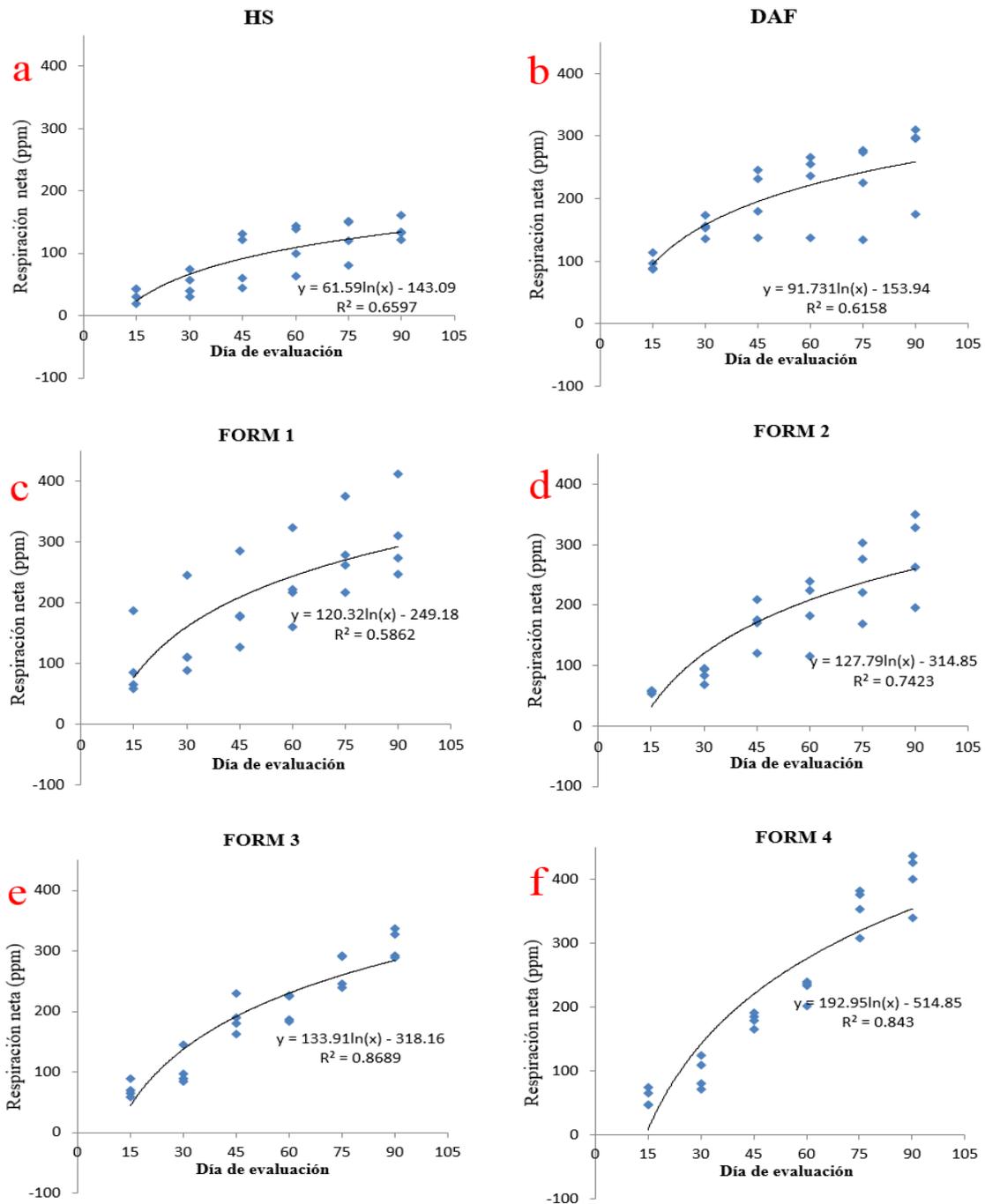


Figura 10: Evolución temporal de la respiración neta: a) harina de sangre; b) lodo de flotación por aire disuelto; c) formulación 1; d) formulación 2; e) formulación 3; f) formulación 4

En la Figura 11 se muestran los promedios de la respiración neta de los tratamientos en el último día de la evaluación (día 90). El mejor tratamiento fue la formulación 4 con un promedio de 400 ppm, y el siguiente fue la formulación 3 con un promedio de 310 ppm. Según la prueba Tukey (Anexo 19), no se hallaron diferencias significativas entre estos dos

tratamientos ni entre la Form 4-Form 1, por el contrario, existen diferencias significativas entre la Form 4-Form 2-DAF-HS-T (Tabla 11).

En el Anexo 9 durante todas las evaluaciones presentan un coeficiente de variación bajo, con resultados menos dispersos y un rango de 10.20 a 24.09 donde la evaluación más dispersa lo tuvo la primera evaluación con un C.V. de 24.09 y la más dispersa lo tuvo la última evaluación con un C.V. de 10.29.

Tabla 11: Efecto de los tratamientos sobre el carbono respirado del suelo

Tratamiento	Carbono respirado (mg C kg ⁻¹ de suelo)
Testigo	981.2 d
Harina de sangre	1118.5 c
DAF	1250.6 b
Formulación 1	1291.7 ab
Formulación 2	1265.1 b
Formulación 3	1292.6 ab
Formulación 4	1381.5 a
p-valor	<0.001
Significación	***
C.V. (%)	11.4

*Medias seguidas de la misma letra en la columna, no difieren estadísticamente según la prueba estadística respectiva al 5 % de significancia

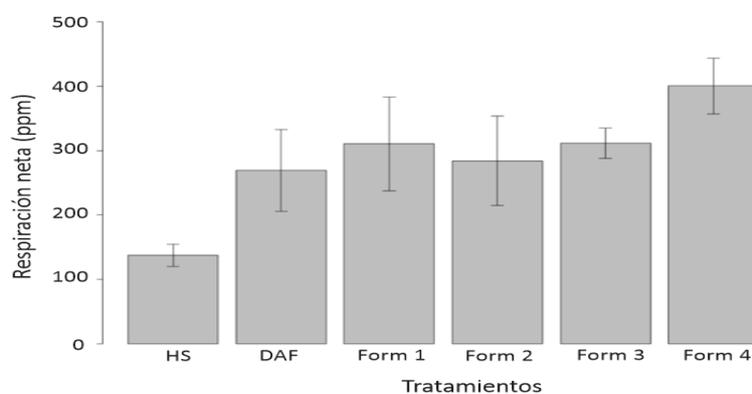


Figura 11. Respiración neta en el día 90 de la evaluación

4.1.4. Cuantificación de la biomasa

4.1.4.1. Altura de planta

La formulación 3, 1 y la fertilización inorgánica, alcanzaron la mayor altura promedio de planta, superando a la formulación 2, harina de sangre y DAF los cuales obtuvieron valores de 130.38 cm, 124.28 cm y 122.16 cm respectivamente. Los que alcanzaron el promedio más bajo fueron los tratamientos con valores de 118.58 cm, 118.45 cm y 111.85 cm respectivamente Según la Figura 12, se observan las barras que grafican los promedios de las repeticiones evaluadas en cada tratamiento, en donde la mayor fue la formulación 3 y la menor fue la formulación 2. Sin embargo, según la prueba de Tukey (Anexo 21) a un nivel de significancia de 0.05, no existen pruebas significativas entre los tratamientos (Tabla 12).

En la Tabla 12 con C.V. de 11.45, al tener un porcentaje de coeficiente de variación bajo, dice que los datos son más homogéneos y con respecto a la aplicación de los abonos orgánicos no tuvo demasiada variación con respecto a la media de altura de planta.

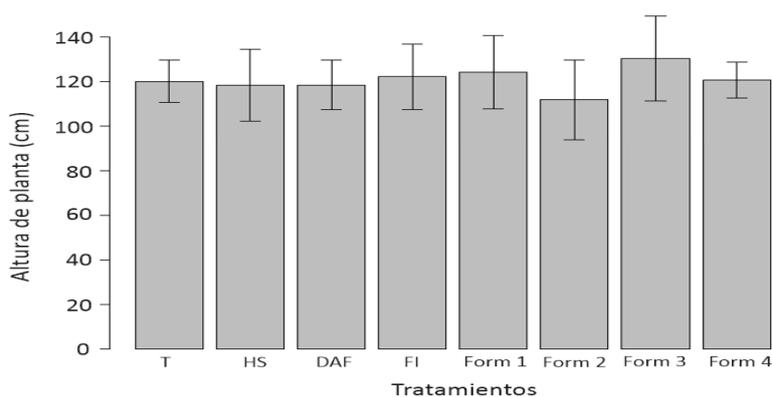


Figura 12. Altura de la planta en el día 90 de la evaluación

En la gráfica boxplot (Figura 15), se observó que las formulaciones 2 y 3 tuvieron la máxima variabilidad de resultados; y que la formulación 4, DAF y el testigo, tuvieron datos más homogéneos.



Figura 13. Altura de planta en la evaluación final



Figura 14: Medición de altura de todos los tratamientos

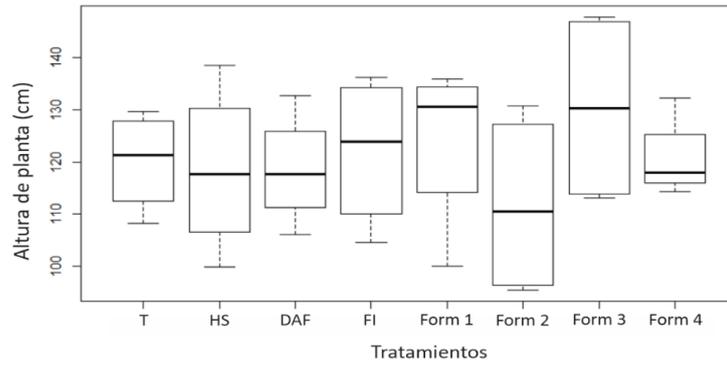


Figura 15. Boxplot de altura de planta para el día 90 de evaluación

4.1.4.2. Peso seco de follaje

Los tratamientos que alcanzaron el promedio más alto fueron las formulaciones 1 y 3, obteniendo valores de 80.5 g y 79.63 g respectivamente (Figura 16). Los tratamientos que alcanzaron el promedio más bajo fue el DAF y el testigo, obteniendo valores de 63.34 g y 63.61 g respectivamente. Según la prueba de Tukey a un nivel de significancia de 0.05 (Anexo 22), no existen diferencias significativas entre la Form 1-Form 3, ni con el T-DAF (Tabla 11).

En la Tabla 13 con coeficiente de variación de 12.18, al tener un porcentaje de coeficiente de variación bajo, dice que los datos son más homogéneos y con respecto a la aplicación de los abonos orgánicos no tuvo demasiada variación con respecto al peso seco de follaje de la planta de maíz. Según el gráfico de Boxplot de la Figura 17, el tratamiento que tuvo mayor variabilidad en sus repeticiones fue la formulación 3 y la menor variabilidad lo tuvo formulación 2 y harina de sangre.

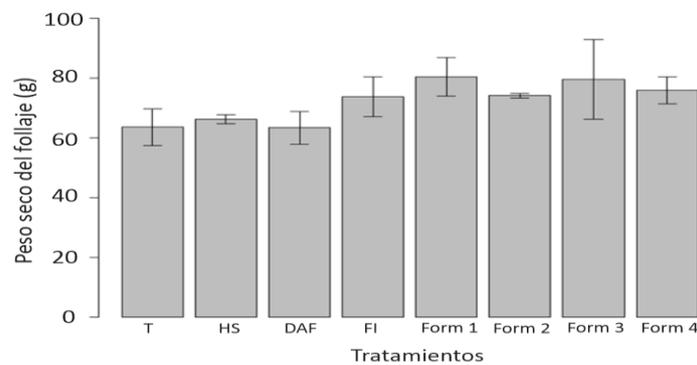


Figura 16. Peso seco del follaje para el día 90 de la última evaluación

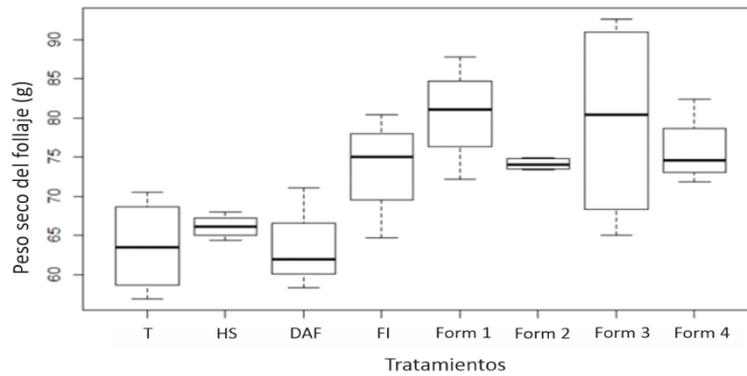


Figura 17. Boxplot del peso seco del follaje a los 90 días de evaluación

4.1.4.3. Peso seco de raíz

Según la Figura 18, los tratamientos que alcanzaron el promedio más alto fueron la fertilización inorgánica y la formulación 2, obteniendo valores de 20.46 g y 15.03 g respectivamente. Los tratamientos que alcanzaron el promedio más bajo fue la harina de sangre y el DAF, obteniendo valores de 10.22 g y 9.88 g respectivamente. Según la prueba de tukey a un nivel de significancia de 0.05 (Anexo 23), existen diferencias significativas entre la FI-Form 2, pero no existen diferencias significativas entre la HS-DAF (Tabla 11). En la Tabla 11 con coeficiente de variación de 26.4, al tener un porcentaje de C.V. bajo, dice que los datos no presentan mucha dispersión y con respecto a la aplicación de los abonos orgánicos no tuvo demasiada variación con respecto al peso seco de raíz.

Según la gráfica de boxplot (Figura 19), los tratamientos que tuvieron mayor variabilidad de datos fueron la fertilización inorgánica y la formulación 2, en tanto que los de menor variabilidad fueron la harina de sangre y la formulación 3.

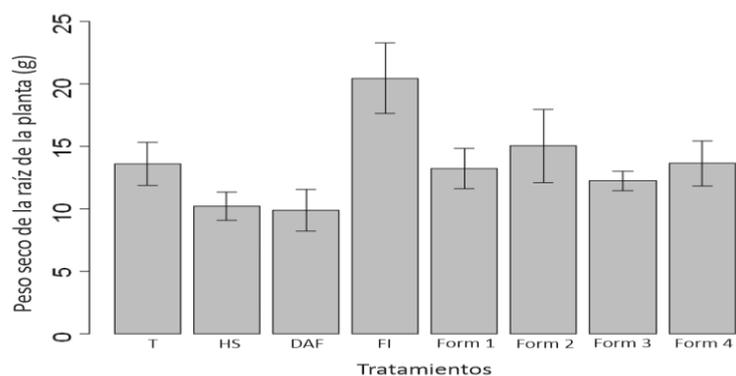


Figura 18. Peso seco de la raíz de la planta

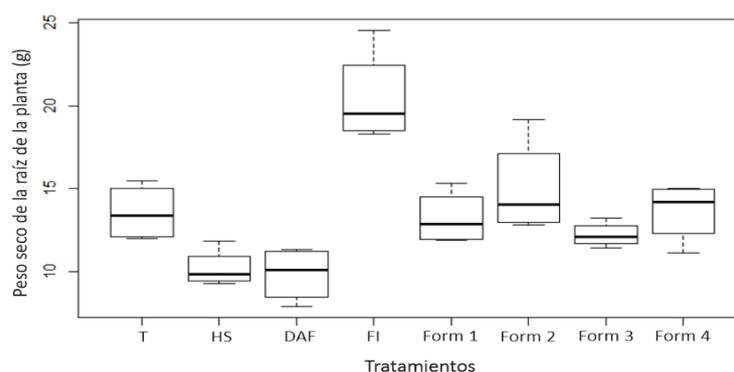


Figura 19. Boxplot del peso seco de la raíz de la planta al día 90 de la evaluación

Tabla 12: Efecto de los tratamientos sobre la altura de planta y peso seco de raíz

Tratamiento	Altura de planta (cm)	Peso seco de raíz (g)
Testigo	120.2 a	13.6 bc
Harina de sangre	118.5 a	10.2 c
DAF	118.6 a	9.88 c
Fertilización inorgánica	122.2 a	20.5 a
Formulación 1	124.3 a	13.2 bc
Formulación 2	111.9 a	15.0 b
Formulación 3	130.4 a	12.2 bc
Formulación 4	120.7 a	13.6 bc
p-valor	0.8078	<0.001
Significación	N.S.	***
C.V. (%)	11.4	26.4

*Medias seguidas de la misma letra en la columna, no difieren estadísticamente según la prueba estadística respectiva al 5 % de significancia

4.1.5. Determinación de la eficiencia de uso de nitrógeno

En el Anexo 12 se tienen los resultados del nitrógeno extraído el cual es el resultado de multiplicar el peso seco de follaje con el porcentaje de nitrógeno. El nitrógeno extraído se da principalmente por la absorción que realiza la planta durante su tiempo de vida. Algunas plantas agrícolas crecen mejor si se les suministra una mezcla de NH_4^+ y NO_3 y dan una respuesta positiva a ambas fuentes en cultivos de maíz y trigo (Perdomo et al., 2007).

En la Figura 20 se tienen los resultados del nitrógeno extraído el cual es el resultado de multiplicar el peso seco del follaje de la planta con el porcentaje de nitrógeno (Tabla 13). Según la prueba de Tukey a un nivel de significancia de 0.05 (Anexo 20), todos los tratamientos el porcentaje de nitrógeno, difieren significativamente del tratamiento testigo. La harina de sangre tiene diferencias significativas con todos los tratamientos. DAF tiene diferencias significativas con las Form 1-Form 2, también existen diferencias significativas entre la Form 1-FI y entre la Form 4-Form 1, el testigo difiere significativamente de todos los tratamientos con el menor porcentaje de nitrógeno.

Finalmente, en base a la extracción de nitrógeno, se realizaron los cálculos para la eficiencia agronómica, eficiencia fisiológica y eficiencia aparente de recuperación (Anexo 9).

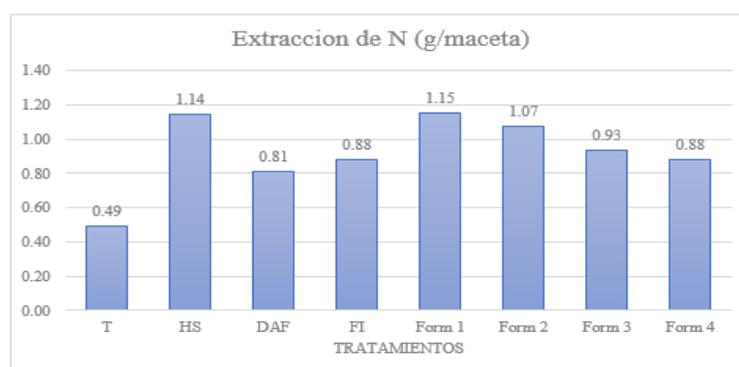


Figura 20. Grafica de la extracción de nitrógeno (g/maceta) que analizó en el laboratorio

En la Tabla 13 el porcentaje de nitrógeno en follaje con un coeficiente de variación de 24.7 y el nitrógeno en follaje con un C.V. de 12.19, al tener un porcentaje de coeficiente de variación bajo, dice que los datos no presentan mucha dispersión y con respecto a la aplicación de los abonos orgánicos no tuvo demasiada variación con respecto a ambos tratamientos respectivamente.

Tabla 13: Efecto de la aplicación de las fuentes orgánicas sobre el peso seco, el contenido de nitrógeno y la extracción total de nitrógeno por el follaje de plantas de maíz

Tratamiento	Peso seco follaje (g/maceta)	N en follaje (%)	Extracción de N (g/maceta)
Testigo	63.6 b	0.78 f	0.49 c
Harina de sangre	66.2 ab	1.73 a	1.14 a
DAF	63.3 b	1.31 de	0.81 b
Fertilización inorgánica	73.8 ab	1.19 de	0.88 b
Formulación 1	80.5 a	1.44 c	1.15 a
Formulación 2	74.1 ab	1.45 b	1.07 ab
Formulación 3	79.6 a	1.18 de	0.93 ab
Formulación 4	75.9 ab	1.16 e	0.88 b
p-valor	0.0034	< 0.001	<0.001
Significación	**	***	***
C.V. (%)	12.19	24.07	24.43

*Medias seguidas de la misma letra en la columna, no difieren estadísticamente según la prueba estadística respectiva al 5 % de significancia

Tabla 14: Determinación de las eficiencias agronómica, fisiológica y aparente de recuperación del nitrógeno

Tratamiento	Eficiencia agronómica (g MS/g N aplicado)	Eficiencia fisiológica (g MS/g N extraído)	Eficiencia aparente de recuperación (%)
Harina de sangre	1.70	3.91	43.5
DAF	-0.18	-0.83	21.4
Fertilización inorgánica	17.0	26.4	64.3
Formulación 1	11.3	25.7	43.9
Formulación 2	7.01	18.1	38.8
Formulación 3	10.7	36.2	29.6
Formulación 4	8.16	31.4	26.0

Fuente: Elaboración propia

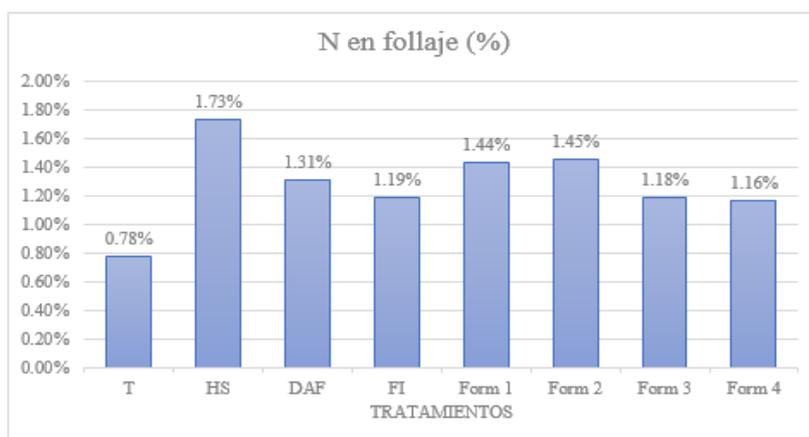


Figura 21. Efecto de dos residuos orgánicos, cuatro abonos formulados y de la fertilización

4.2. Discusión de resultados

4.2.1. Calidad de datos

Dentro de todas las variables de estudio, solo algunas resultaron tener distribución normal. Las que no cumplieron con la normalidad, posiblemente se vieron afectadas a causa de que los valores iban aumentando conforme al tiempo transcurrido, sin embargo, esto no impidió su análisis, puesto que se pudo aplicar unas pruebas no paramétricas equivalente a la prueba de Tukey (Gómez, Danglot y Vega, 2003).

4.2.2. Mineralización de nitrógeno

En el análisis de la mineralización de nitrógeno, se compararon todos los tratamientos a excepción de la fertilización inorgánica, dado que el objetivo del estudio fue comparar la efectividad de los tratamientos con fertilización orgánica. De hecho, el fertilizante inorgánico produjo una liberación de nitrógeno mineral mucho mayor al de las materias orgánicas porque tiene el nitrógeno muy disponible el consumo de la planta. Como lo menciona Llanos (como se citó en Castro, 2018) menciona que el maíz absorbe la mayor parte del nitrógeno en forma nítrica (NO_3^-), el material orgánico al pasar por un proceso de mineralización recién tendría formas absorbibles para la planta como NO_3^- y NH_4^+ ; en cambio un fertilizante inorgánico esas formas absorbibles ya se encuentran disponibles en el fertilizante usado (formato diamónico y nitrato de amonio). Según Figueroa et al. (2012), la aplicación de los materiales orgánicos como fertilizantes, es una práctica usual en los sistemas orgánicos de producción, sin embargo, menciona que existen pocos criterios

técnicos para la cuantificación de las dosis necesarias con el cuales se podría evitar la afectación de la rentabilidad del sistema productivo. Estos mismos autores, determinaron la tasa de mineralización de materias orgánicas usando el mismo método de incubación de la presente investigación. La formulación 4 tuvo un valor negativo (Figura 6), esto se debió a la inmovilización por parte de los microorganismos, esto coincidió con lo afirmado por Li & Li (2014) reportaron una inmovilización neta en los suelos mezclados con estiércol de aves antes de los 28 días de incubación. Desde el día 30 se tiene un decrecimiento hacia el día 45, presentando inmovilización por parte de la formulación 4 y la formulación 3, esta inmovilización durante las evaluaciones lo dice en su investigación Azeez & Van (2010), donde se observaron en procesos alternados de mineralización neta e inmovilización, durante cortos periodos de tiempo, a lo largo de 120 días de incubación. Según la incubación y los datos obtenidos durante todas las evaluaciones del nitrógeno mineral esto está coincidiendo la investigación realizada por Li & Li (2014) donde observaron cuatro fases de mineralización durante la incubación de estiércol de aves mezclado con suelo agrícola: una fase inicial de liberación rápida (10-20 días), seguida de una fase lenta (30-40 días), una fase de mineralización máxima (55-90 días) y finalmente una fase de mineralización declinada (120 días).

4.2.2.1. Amonificación y nitrificación

En la Figura 7, los tratamientos que tuvieron mayor cantidad de amonio mineralizado en la primera evaluación fueron la de harina de sangre y la formulación 2, y coincidentemente, esta última tuvo la mayor cantidad de HS en su composición. De hecho, la harina de sangre contiene compuestos más lábiles o fácilmente mineralizable (Tarté citado por Talledo y Chávez, 2014), la sangre es un elemento constante en los organismos y tiene una composición química media del 80 % agua, 18 % de proteínas y 2 % de hidratos de carbono, lípidos y sales minerales, siendo las proteínas e hidratos de carbono, los compuestos de más fácil mineralización.

Durante las siguientes evaluaciones, la concentración de amonio fue descendiendo debido a la inmovilización por parte de los microorganismos, fijación del suelo y principalmente el paso de amonio a nitrato, teniendo en la última evaluación valores negativos para la Form 1, Form 2, Form 3 y Form 4; y valores positivos para la harina de sangre y DAF. El testigo presenta un comportamiento casi constante durante todas las evaluaciones con valores negativos. McNeill & Unkovich (2007) mencionan que una vez que el NH_4^+ es absorbido

por la planta, se incorpora rápidamente en forma de aminoácidos para evitar toxicidad. En la Tabla 10 el DAF presenta la mayor concentración de amonio neto con 28.1 ppm, seguida de la harina de sangre con 1.38 ppm y la que tuvo menor producción de amonio fue la formulación 3 con -21.4 ppm, esto quiere decir que todo el amonio pudo ser oxidados hasta nitratos, inmovilizado por microorganismo, volatilizado, absorbidos por minerales arcillosos o materia orgánica (Fassbender y Bornemisza, 1987). En la gráfica de amonio neto (Figura 7) durante la primera evaluación tuvo un gran contenido de nitrógeno que durante las siguientes evaluaciones fue descendiendo la liberación de amonio, como lo menciona Figueroa et al. (2012), observo que durante las primeras semanas de incubación, la mineralización de nitrógeno fue más rápida, debido a que este periodo se produce la descomposición de azúcares, proteínas, y celulosa, haciendo más lenta en las últimas semanas donde se están mineralizando aquellos materiales más resistentes.

Por otro lado, durante la primera evaluación en la gráfica de nitrato de la Figura 6, existen valores positivos de nitrato acumulado (tratamiento más el suelo) que van en aumento durante todas las evaluaciones, a diferencia del testigo se mantiene constante durante toda la mineralización. En la gráfica de nitrato neto durante la primera evaluación, todos los tratamientos menos la harina de sangre tuvieron valores negativos debido a la inmovilización de nitrógeno mineral por parte de los microorganismos ya que estos naturalmente tienden a consumir nitrógeno y aumentar su población al tener la presencia de materia o restos orgánicos, generando un déficit en la concentración de nitrógeno; es como un proceso inverso a la mineralización, porque el nitrógeno inorgánico se transforma en nitrógeno orgánico, siendo parte de la biomasa de los microorganismos (Villalobos et al., como se citó en Gordillo, 2010), ya que también parte del nitrógeno mineral todavía se encuentra en proceso de oxidación a nitratos encontrándose en forma de amonio (Figura 7). Durante las siguientes evaluaciones la concentración de nitratos fue en aumento, resultando al final de la evaluación, la formulación 3 con mayor concentración de nitratos con 370.6 ppm, seguido de la formulación 4 con 319.47 ppm y la de menor concentración de nitratos fue la harina de sangre con 193.3 ppm (Tabla 10). En el día 15 todos los tratamientos a excepción de la harina de sangre presentaron valores negativos, esto pudo ser debido a una inmovilización por parte de microorganismo o poca mineralización de $N-NH_4^+$ a $N-NO_3^-$, Li & Li (2014), en un estudio de mineralización de estiércol de aves, reportaron incremento rápido de amonio hasta los 14 días, seguido de un declive hasta los 161 días; La formulación 3 tuvo un ligero decrecimiento en la liberación del día 75 hacia el día 90, la mineralización de $N-NH_4^+$ pudo ser oxidado

hasta N-NO_3^- y también inmovilizado por microorganismos (Fassbender y Bornemisza, 1987).

El que ocurra mineralización o inmovilización de nitrógeno depende en gran medida de la relación C/N de la materia orgánica en descomposición. Al inicio de la descomposición de los residuos orgánicos del suelo se observa un rápido crecimiento de la población de microorganismos heterótrofos, Alexander, 1977; Nahm, 2005 (como se citó en Gordillo, 2010). Cuando los residuos aportados al suelo poseen una relación C/N de 30 o mayor, se produce una pérdida temporal de nitrógeno mineral que puede manifestarse durante varias semanas, durante las que la pérdida de CO_2 por causa de la respiración microbiana produce un descenso de la relación C/N. El descenso de carbono en el suelo hace descender la población microbiana. En ese momento, parte del nitrógeno contenido en su biomasa vuelve a incorporarse al proceso de mineralización.

Esta inmovilización es el paso de nitrato o amonio ya mineralizado a formas orgánicas. Primero el microorganismo consume al amonio y nitrato como fuente inorgánica y en su interior lo procesa como forma orgánica para constituir sus tejidos. Por ejemplo, una materia orgánica con mucha paja es mala fuente, porque su contenido elevado de carbono aumenta la población de microorganismos que no se satisfacen con el nitrógeno de la materia orgánica, sino que incluso consumen el nitrógeno del suelo. Esto es justamente lo que pudo haber pasado en el experimento, generarse inmovilización de nitrógeno en la primera semana porque la población de microorganismos que ya estaban en el suelo tomó casi todo el nitrógeno de la materia orgánica. Según Villalobos *et al.* (como se citó en Gordillo, 2010), la inmovilización del nitrógeno es el pase del NO_3^- o NH_4^+ , a la biomasa vegetal o microbiana, ya que el nitrógeno inorgánico se transforma en nitrógeno orgánico.

4.2.2.2. Tasa de mineralización

En el modelo logarítmico de la Figura 9 cabe resaltar que el grado de ajuste del modelo logarítmico para todos los tratamientos a excepción del DAF, tuvieron un R^2 menor a 0.80, esta observación indica que al tener el modelo logarítmico con un bajo grado de ajuste, la confiabilidad del mismo para predecir la tasa de mineralización no es confiable, por lo que las ecuaciones solo se podrán usar para esta investigación mas no fines de predicción de tasa de mineralización.

La mayor tasa de mineralización (Tabla 10) de la formulación 3 con 349.22 ppm representa un 69.8 % que puede atribuirse a la mezcla de cadáveres de pollo de descarte como composición adicional a diferencia los otros tratamientos, haciéndolo una formulación con un mejor balance de los restos orgánicos mezclados. El segundo mejor tratamiento fue la formulación 4 con 325.28 pm representando un 65.1 % de nitrógeno mineralizado, en estos tratamientos se tuvo el mayor porcentaje de nitrógeno mineralizado, siendo de provecho para una planta de ciclo corto que exige al suelo en su consumo de nitrógeno mineral.

La tasa de mineralización tuvo un pico máximo solo para la formulación 3 el día 75 con 357.5 mg Kg⁻¹ representando una tasa de mineralización del 71.5 %, a comparación con el estudio realizado por Abbasi *et al.*, (2007), en un suelo agrícola con estiércol de aves liberó el 10% de N mineral en su punto máximo de los 55 hasta los 90 días después de la incubación., los demás tratamientos tuvieron su mayor pico de mineralización al día 90 el DAF con 65.1 %, la formulación 4 con 60.7 %, según lo investigado por Figueroa *et al.* (2012) , su mejor tratamiento fue la conejaza el cual liberó 5197 ppm de nitrógeno mineral al día 70 de la evaluación, representando el 20 % del nitrógeno total inicial aplicado; con esto la mineralización de los 2 mejores tratamientos da una mejor tasa de mineralización durante toda la evaluación (90 días).

Figueroa *et al.* (2012) observaron en sus resultados, que las materias orgánicas que presentaron una liberación muy baja de nitratos pudieron ser ocasionado por la inmovilización producida por las bacterias nitrificantes, o simplemente porque el material no puede mineralizar más nitrógeno; de modo que es muy importante determinar la composición de la estructura del material orgánico para predecir si su tasa de mineralización será alta o baja, además de la presencia de bacterias nitrificantes.

Asimismo, los residuos ganaderos presentan una enorme variabilidad en su composición y por lo tanto en el contenido de nutrientes para los vegetales. Esto depende de muchos factores tales como: sistema de estabulación, alimentación, sistema de limpieza, tratamiento y duración del almacenaje, etc. (Sosa *et al.*, 2016). Básicamente, los fertilizantes orgánicos constituyen una importante fuente de MO y nutrientes como N, fósforo (P) y potasio (K) necesarios para el crecimiento de la planta.

4.2.3. Tasa de respiración

Según las curvas logarítmicas, el tratamiento con mayor tasa de respiración fue la formulación 4, el cual a su vez tuvo la mayor cantidad de carbono según la Figura 10: Según Gordillo (2010), el descenso del carbono en el suelo hace descender la población microbiana y parte del nitrógeno contenido en su biomasa vuelve a incorporarse al proceso de mineralización.

Desde el día 15 al día 30 se muestra un incremento en la respiración, donde este incremento se puede atribuir al contenido de C orgánico presente en las materias orgánicas aplicadas, los cuales suministraron el sustrato necesario para la proliferación de los microorganismos presentes en el suelo que fueron responsables de la descomposición. La actividad de los microorganismos que intervienen al inicio del proceso es máxima, como consecuencia de tener a su alcance gran cantidad de compuestos fácilmente biodegradables procedentes de los materiales orgánicos de partida (Acosta et al., 2006), después desde el día 30 hacia el día 60, se tiene una respiración baja, debiéndose a compuesto de mayor resistencia y como lo indica en su estudio Ayuso et al. (1996), mientras más estable es la materia orgánica, la emisión de CO₂ y la actividad microbiana son menores ya que existe menos material de fácil descomposición lo que impide la degradación por parte de los microorganismos. La mineralización del nitrógeno tuvo un comportamiento con misma tendencia mostrada que el carbono respirado analizadas durante todas las evaluaciones, en lo que se identifica una relación directa entre ambas gráficas. En su estudio, Cardona (2017) evalúa la relación que existe entre la actividad microbiana y tasa de mineralización del nitrógeno siendo estas relaciones directas que van juntas, mientras haya una buena actividad microbiana, habrá una considerable parte de N mineral. Teniendo a la formulación 4 y 3 con la mayor tasa de carbono respirado, sucediendo lo mismo con el nitrógeno mineral siendo los que liberaron mayor contenido de N mineral. El descenso de carbono orgánico total está relacionado con la degradación y la mineralización de materia orgánica ya que los microorganismos consumen el carbono y el nitrógeno de la materia orgánica para aumentar su población. La respiración efectuada por los microorganismos hace que se pierdan aproximadamente dos tercios de C como CO₂, y el tercio restante es inmovilizado por los mismos microorganismos para formar más tejido microbiano (Perdomo et al., 2007).

Por otro lado (Tabla 11), aunque la formulación 4 obtuvo la mayor tasa de respiración, la formulación 3 obtuvo la mayor tasa de mineralización de nitrógeno. Esto puede deberse al

aporte de enmiendas orgánicas al suelo que genera un incremento en la cantidad de N de la biomasa microbiana, sin importar el tipo de suelo (Monsalve et al., 2017). Por otro lado, puede que el flujo del aire no haya retenido el CO₂ completamente por el filtro alcalino causando una absorción incompleta del CO₂ y una sobreestimación de la respiración (Krebs, 2003). La concentración de NaOH también determina la magnitud del error experimental por efecto de la titulación y el manipuleo de la muestra (Cheng y Colemann, 1989). El tratamiento con menor tasa de respiración de carbono fue la harina de sangre esto pudo ser debido a la baja relación C/N y a la baja actividad de microorganismos por el déficit de carbono; la relación C/N que presenta la harina de sangre según Uicab y Sandoval (2003) es del 2 %, ocasionando un exceso de nitrógeno liberado ya que parte del nitrógeno es liberado y por consiguiente ocasiona pérdida de nitrógeno, esta baja fuente de energía por parte del carbono, ocasiona una baja tasa de reproducción y crecimiento de los micro orgánicos, esto sucede ya que el peso del resto avícola está en base al contenido de nitrógeno usado en el experimento. De igual manera, la mineralización de N, producto de la actividad microbiana, siguió la misma tendencia mostrada en la respiración (Cardona, 2017).

4.2.4. Cuantificación de la biomasa

Según el análisis estadístico se observó que la altura de planta del tratamiento testigo fue similar a los demás tratamientos en los que se les aplicó los restos orgánicos avícolas y la fertilización inorgánica (Anexo 21). Además de ello se observa que la altura de planta (Figura 12) de la fertilización inorgánica no tuvo diferencias significativas con los tratamientos a los que se aplicó fertilizante orgánico. Esto puede deberse a que el fertilizante inorgánico tiene partes equivalentes de nitrato y amonio, de los cuales el nitrato es absorbido más fácilmente por la planta, en tanto que el amonio no. Pudo haber pasado que, al momento de regar la planta, el nitrato se haya lixiviado por el agua y se haya acumulado en el fondo de la maceta, impidiendo ser aprovechado por la planta. En el boxplot la formulación 4 tuvo datos menos dispersos a comparación de los demás tratamientos y el testigo, esta fórmula aplicada resultaría en plantas con alturas más homogéneas, la formulación 3 tuvo una mediana más alta que los demás tratamientos y su rango fue mucho mayor a los demás tratamientos, pero la mayoría de sus datos se encuentran por encima de los demás tratamientos.

Comparando los resultados del peso seco de la raíz (Figura 18) con los resultados del peso seco del follaje (Figura 16) en donde la fertilización inorgánica no obtuvo una respuesta

similar a los demás tratamientos, los resultados del peso seco de la raíz indicaron que el tratamiento con fertilización inorgánica fue el mejor y que incluso existieron diferencias significativas con los otros tratamientos. Lo que pudo influir en el peso seco de la raíz, es el abono inorgánico que, a diferencia de las enmiendas orgánicas, tiene el fósforo disponible y listo para el consumo de la planta. Según Fernández (2007), el fósforo es un elemento vital importancia para la generación de células nuevas y por lo tanto para la producción de raíces al inicio de los ciclos vegetativos. Según la Figura 16 la formulación 1 y 3 tuvieron mayor peso a diferencia de los demás tratamientos, esta aplicación de fertilizante mejor desarrollo de follaje de planta por ende en un mejor peso seco de follaje, a diferencia del DAF tuvo el menor peso seco de follaje, este tratamiento tuvo un efecto negativo en la producción de follaje de planta, siendo el testigo mayor que el DAF; en la fertilización inorgánica el nitrógeno en forma nítrica no tuvo efectos favorables para el desarrollo de follaje esto pudo deberse a que el riego aplicado lixivió al nitrato al fondo de la maceta, y no pudo ser aprovechado por la planta. En el Boxplot peso seco de follaje (Figura 17) la harina de sangre y formulación 2, tuvieron datos menos dispersos a comparación de los demás tratamientos dando con un follaje más uniforme, al igual que la altura de planta (Figura 15) la formulación 3 tuvo datos más dispersos con su aplicación.

Según Tabla 12 el testigo no tuvo diferencias significativas con ninguna de las formulaciones, la aplicación de los tratamientos a excepción de la fertilización inorgánica, la aplicación de estos tratamientos no tuvo efectos positivos en la formación de masa radicular y por ende en un mayor peso seco.

4.2.5. Determinación de la eficiencia de uso de nitrógeno

Es muy importante que en el laboratorio se tenga cuidado al momento de tomar la muestra de nitrógeno extraído de la planta, ya que los pecíolos son tejidos conectivos que poseen mayor variabilidad de concentraciones de nutrientes como N, P y K, en comparación a la lámina de hojas, lo cual puede conducir a errores a la hora de interpretar resultados si se incluyen ambos tejidos en la muestra (Correndo & García, 2012).

Según la Tabla 14, se observa que la fertilización inorgánica presenta valores más altos que los demás tratamientos, esto puede ser relacionado a su estado del nitrógeno en forma de nitratos que es el nitrógeno fácilmente absorbido por parte de la planta. En los tratamientos con restos orgánicos avícolas, la eficiencia agronómica de la formulación 1 fue la mejor, seguido de la formulación 3 con 11.3 y 10.7 g MS/g N aplicado respectivamente. Esto podría

deberse al cálculo efectuado en el cual se considera la materia seca producida por cada gramo de nitrógeno aplicado al principio de la evaluación. Según Good *et al.* (como se citó en Rico, 2013), la eficiencia agronómica mide la conversión de nitrógeno aplicado en producto cosechable, en efecto, cuando se aplica N se incrementa la eficiencia de la planta para producir materia seca, la fertilización inorgánica tuvo una eficiencia agronómica baja con 6.79 g MS/g N aplicado, esto pudo ser ocasionado a la efectividad de un fertilizante inorgánico durante el tiempo desde su aplicación y con mencionado en su estudio, esto podría atribuirse a que cuando se aplican grandes cantidades de N, las pérdidas por volatilización y desnitrificación son mayores, además, la planta absorbe la cantidad que necesita de cada nutrimento y el resto queda libre, inmovilizado por los microorganismos o fijado en arcillas (Ramos-Lara et al., 2002), también según estudios realizados por Según González (2016), la mejor EAN en maíz forrajero la encontraron con valores de 11,1 a 29,3 kg MS/kg N aplicado, por lo tanto la formulación 1 se encuentra dentro del rango dado por González. El peor tratamiento con la menor eficiencia agronómica lo tuvo el lodo de flotación por aire disuelto (DAF) con -0.18 g MS/g N aplicado, estos se deben a los contaminantes por parte del tratamientos, el sistema que maneja aguas residuales acarrea elementos tóxicos nocivos para la planta, y por lo estudiado por Cano (2015), los contaminantes de importancia de un sistema de flotación son sólidos en suspensión, materia orgánica biodegradable, patógenos, nutrientes, contaminantes prioritarios tóxicos, materia orgánica refractaria, metales pesados y sólidos inorgánicos.

Asimismo, de la Tabla 14 el tratamiento que obtuvo la mayor eficiencia fisiológica fue la formulación 3 con 36.2 g MS/g N extraído, esta enmienda aplicada produce el segundo mejor peso de follaje de la Tabla 13 con 79.6 g/maceta y la formulación 1 fue el segundo tratamiento con la mejor eficiencia fisiológica con 25.7 g MS/g N extraído y produjo el mejor peso seco de follaje con 80.5 g/maceta, esta enmienda produce un mejor aprovechamiento e incorporación del nitrógeno; asimismo la formulación 3 tuvo la mejor producción de nitrógeno mineral neto en la última evaluación (Tabla 10), dando lugar a un buen aprovechamiento del nitrógeno mineral por parte de la planta, pero no sucedió lo mismo con el DAF, a pesar que no tuvo diferencias significativas con la formulación 3 su eficiencia fisiológica resulto siendo la más bajas con -0.83. El DAF presentó una eficiencia fisiológica negativa (-0.83 g MS/g N extraído), el tratamiento aparte de tener nitrógeno tuvo elementos tóxicos, dañinos o que pudieron bloquear la absorción del nitrógeno por parte de la planta, esto se vio reflejado también en el peso seco de follaje en la Tabla 13, ya que tuvo el menor

peso de todos los tratamientos con 63.3 g/maceta. Esto podría deberse a que el cálculo efectuado, al cual se considera la materia seca neta del tratamiento que fue producida por la incorporación de cada gramo de nitrógeno absorbido. Según Good *et al.* (como se citó en Rico, 2013), la eficiencia fisiológica mide la eficiencia con el que el cultivo usa nitrógeno absorbido para producir producto cosechable, con esta eficiencia se ve que la formulación 3 uso menos nitrógeno o lo tomo mejor eficientemente la planta para dar un buen rendimiento en la parte cosechable, siendo fisiológicamente más atractivo el nitrógeno por la planta, en comparación con la formulación 1, la formulación utilizo mejor incorporado, la formulación 4 tuvo la segunda mejor eficiencia fisiológica, esto pudo ser afectado y no pudo tener una mejor eficiencia fisiológica ya que en su mezcla tiene un 40 % de lodo de flotación por aire disuelto (DAF), ocasionando efectos tóxicos para la planta. pero no sucedió lo mismo con el DAF.

Finalmente se observa en la Tabla 14, la eficiencia aparente de recuperación, la formulación 1 con 44 %, teniendo la mayor eficiencia aparente de recuperación, la segunda mejor eficiencia lo tuvo la harina de sangre con 43.2, recupero gran parte del nitrógeno aplicado, pero fisiológicamente no tuvo efectos positivos mostrando en la tabla 6, tiene una eficiencia fisiológica baja, que pudo ser debido al excesivo amonio producido como se muestra en la gráfica (figura 1, b), ocasionando un efecto toxico por parte del tratamiento hacia la planta de maíz. Según lo estudiado por Zemenchik y Albrecht (como se citó en Gonzáles et al., 2016), la eficiencia de recuperación representa el porcentaje de N aplicado, como fertilizante, que es extraído por la parte aérea o cosechada del cultivo y se utiliza como un indicador de la disponibilidad de N. Los resultados son similares a los de McDonald *et al.* (como se citó en Bush *et al.*, 2015) quien encontró que la recuperación del fertilizante aplicado fluctuaba entre el 26 y el 60%, dependiendo del cultivo y las condiciones ambientales, teniendo a la formulación 1, Harina de sangre, formulación 2 y formación 3 dentro del rango dado por Mc Donald.

V. CONCLUSIONES

- La tasa de mineralización de nitrógeno de los abonos orgánicos experimentales ensayados varió entre 39 % y 69.8 %, destacando la formulación 3 en cantidad de nitrógeno mineralizado.
- La evaluación de la tasa de respiración indicó que las formulaciones 3 y 4 mostraron la mayor tasa de mineralización de carbono.
- La formulación 3 incrementó la altura de plantas de maíz en 10.2 cm con respecto al testigo. La fertilización inorgánica incrementó la producción de materia seca de las raíces en 6.9 cm y la formulación 1 incrementó el peso seco del follaje en 16.9 g.
- La eficiencia del uso del nitrógeno (EUN), la E.A vario entre -0.18 y 10.68 g MS/g N aplicado, E.F vario entre -0.8y 35.84 MS/g N extraído y la E.A.R vario entre 22.35 y 43.22 %; siendo las formulaciones 1 y 3 los abonos más eficientes.

VI. RECOMENDACIONES

- La tasa de mineralización del nitrógeno y la absorción de nitrógeno por la planta frente a una fertilización inorgánica, permiten recomendar el uso de las formulaciones 1 y 3 para realizar ensayos a nivel de un campo.
- El lodo de flotación (DAF) mostró baja tasa de mineralización, por lo que no se recomienda su uso para la elaboración de abonos orgánicos, a menos que sea en mezcla con fuentes de mineralización más rápida.
- El uso del abono orgánico para el agricultor se recomienda el tapado y regado del abono orgánico durante las primeras semanas para evitar la volatilización, ya que se produce exceso de amonio durante las primeras semanas.
- Se recomienda realizar más ensayo a la formulación 1 y 3 para mejorar el contenido de fosforo y potasio, se puede probar con diferentes restos orgánicos de otros animales, para poder mejorar o encontrar mejores alternativas y obtener un mejor abono orgánico para los cultivos.

VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abbasi, M.K.; Hina, M.; Khalique, A.; Khan, S.R. (2007). Mineralization of three organic manures used as nitrogen source in a soil incubated under laboratory conditions. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 38: 1691-1700.
- Acosta, Y.; Cayama, J.; Gómez, E.; Reyes, N.; Rojas, D.; García, H. (2006). Respiración microbiana y prueba de fitotoxicidad en el proceso de compostaje de una mezcla de residuos orgánicos. *Multiciencias*, 6: 220-227.
- Andrade, F.; Cirilo, A. G.; Uhart, S.; Otegui, M. (1996). Ecofisiología del cultivo de maíz. Buenos Aires, Argentina: La Barrosa.
- Ayuso, M., J. A. Pascual, C. García, and T. Hernández. (1996). Evaluation of urban wastes for agricultural use. *Soil Science and Plant Nutrition*, 42: 105-109.
- Azeez, J.O.; Van Averbek, W. (2010). Nitrogen mineralization potential of three animal manures applied on a sandy clay loam soil. *Bioresource Technology*, 101: 5645-5648.
- Atlas, M.R.; Bartha, R. 2002. Ecología microbiana y microbiología ambiental (4° ed.). Madrid, España: Addison Wesley.
- Beingolea, L; Manrique, A.; Fegan, W.; Sánchez, H.; Noriega, V.; Borbor, M. (1993). Maíces híbridos y variedades mejoradas. En J. Davelouis y J. Nakahodo (Eds.), Manual del maíz para la costa (p. 17-47). Lima, Perú: UNALM.
- Berrocal, D. (2016). Efecto de los abonos orgánicos en el crecimiento de plantones de café (*Coffea arabica* L.) bajo condiciones de invernadero. Tesis Ing. Agr. Universidad Nacional Agraria de la Selva. Recuperada de http://repositorio.unas.edu.pe/bitstream/handle/UNAS/1571/DDB_2016.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Bonadeo, E.; Moreno, I.; Bongogiovanni, M; Marzari, R.; Ganum, M.J. (2017). Consulta rápida. El sistema suelo-planta. Rio Cuarto, Argentina: Unirio.
- Brady, N.; Weil, R. (2008). The nature and properties of soils. New Jersey, EE.UU.: Pearson.

- Boyd, C.E.; Wood, C.W.; Thunjai, T. (2002). Aquaculture pond bottom soils quality (pp. 14-15). Recuperado de https://www.researchgate.net/profile/Claude_Boyd/publication/242592208_Aquaculture_Pond_Bottom_Soil_Quality_Management/links/02e7e53331eb01f05c000000/Aquaculture-Pond-Bottom-Soil-Quality-Management.pdf
- Buckman, H.O.; Brady, N.C. (1977). The nature and properties of soils. New York, EE.UU. The McMillan.
- Caldera, Y.; Gutiérrez, E.; Luengo, M.; Chávez, J.; Ruesga, L. (2010). Evaluación de sistemas de tratamiento de aguas residuales de industria avícola. *Revista Científica de Veterinaria*, 20(4): 409-416.
- Bush, G.; Ruiz, R.A.; Micucci, F.G. (2005). Fertilización en maíz en la región Chaqueña. Análisis de la respuesta del cultivo mediante un balance de nitrógeno. [http://lacs.ipni.net/ipniweb/region/lacs.nsf/e0f085ed5f091b1b852579000057902e/7310afb32c62918a032579030053e4a5/\\$FILE/Tesis.%20Esp.%20G.%20Bush%20-%20N%20en%20maiz%20en%20Region%20Chaque%C3%B1a.pdf](http://lacs.ipni.net/ipniweb/region/lacs.nsf/e0f085ed5f091b1b852579000057902e/7310afb32c62918a032579030053e4a5/$FILE/Tesis.%20Esp.%20G.%20Bush%20-%20N%20en%20maiz%20en%20Region%20Chaque%C3%B1a.pdf)
- Calvo, S. (2011). Bacterias simbióticas de nitrógeno. Universidad de Salamanca, 3:175-176. Recuperado de <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=3761553>
- Cardona, W.A. (2017). Factores que intervienen en el proceso de mineralización de nitrógeno cuando son aplicadas enmiendas orgánicas al suelo. *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas*, 11(1): 200-209.
- Castro, L.A. (2018). Momentos de aplicación de la fertilización nitrogenada a base de sulfato de amonio en el cultivo de maíz choclo (*Zea mays* L.) en el valle del medio Piura. Tesis Ing. Agr. Universidad Nacional de Piura. Recuperada de <http://repositorio.unp.edu.pe/bitstream/handle/UNP/1255/AGR-CAS-PAN-18.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Cerrato, M.E.; Leblanc, H.A.; Kameko, C. (2007). Potencial de mineralización de nitrógeno de Bokashi, compost y lombricompost producidos en la Universidad Earth. *Tierra Tropical*, 3(2), 183–197.
- Chapman, H.D.; Pratt, P.F. (1979). Métodos de análisis para suelos, plantas y aguas. Editorial Trillas, México. 195 p.

- Cheng, W.; Coleman, D.C. (1989). A simple method for measuring CO₂ in a continuous air-flow system: modification to the substrate-induced respiration technique. *Soil Biology and Biochemistry*, 21(3): 385-388.
- Correa, D. (2016). Biodiversidad y ecología funcional de bacterias desnitrificantes. Tesis Dr. en especialidad de microbiología, Universidad de Granada. Recuperado de: <https://hera.ugr.es/tesisugr/25962140.pdf>
- Correndo, A.A.; Garcia, F.O. (2012). Concentración de nutrientes en planta como herramienta de diagnóstico: Cultivos extensivos. International Plant Nutrition Intitute (IPNI), N° 14. [http://www.ipni.net/publication/ia-lacs.nsf/0/2983F9B934DDE60D852579BA00747DF4/\\$FILE/AA14.pdf](http://www.ipni.net/publication/ia-lacs.nsf/0/2983F9B934DDE60D852579BA00747DF4/$FILE/AA14.pdf)
- Cruz, K.F. (2019). Mapeo y análisis de calidad física y química de los suelos agrícolas de la Universidad Nacional Agraria La Molina aplicación como herramientas SIG. Tesis Ing. Agric. UNALM Recuperada de <http://repositorio.lamolina.edu.pe/bitstream/handle/UNALM/3939/cruz-fajardo-kevin-fernando.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Dalzell, M.; Biddlestone, A. (1991). Introducción. ONU y FAO (Eds.), Manejo del suelo: producción y uso del compost en ambientes tropicales y subtropicales (pp. 6-7). Roma, Italia: FAO.
- De la Cruz, J.C. (2016). Fraccionamiento de nitrógeno en dos densidades de siembra de maíz amarillo duro (*Zea mays* L.) en la localidad de La Molina. Tesis Ing. Agr., UNALM. Recuperada de <http://repositorio.lamolina.edu.pe/bitstream/handle/UNALM/1961/F01-C794-T.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.
- Elizondo, J. (2006). El nitrógeno en los sistemas ganaderos de leche. *Agronomía mesoamericana*, 17(1): 71-72.
- Fassbender, H.W.; Bornemisza, E. (1987). Química de suelos con énfasis en suelos de América Latina (2° ed.). San José, Costa Rica: IICA.
- Figueroa-Barrera, A.; Alvarez-Herrera, J.; Forero, A.; Salamanca, C.; Pinzón, L. (2012). Determinación del nitrógeno potencialmente mineralizable y la tasa de mineralización de nitrógeno en materiales orgánicos. *Temas Agrarios*, 17(1): 32. <https://doi.org/10.21897/rta.v17i1.694>

- Fernández, M.T. (2007). Fósforo: amigo o enemigo. *Revista ICICDCA*, 41(2): 54. Recuperado <https://www.redalyc.org/pdf/2231/223114970009.pdf>
- Fleming, R.; Macalpine, M. (2005). Composting blood (slaughterhouse waste) mixed with various substrates. Ridgetown College, University of Guelph, Canada. En: https://www.ridgetownc.com/research/documents/fleming_Final_Report_-_Compost_Blood.pdf
- Florida, N. (2019). Plumas: Implicancia ambiental y uso en la industria agropecuaria. *Revista de investigaciones altoandinas*, 21(3). Recuperado de <http://www.scielo.org.pe/pdf/ria/v21n3/a08v21n3.pdf>
- Gandarilla, J.E. (1988). Empleo del estiércol vacuno para mejorar un suelo improductivo de la provincia de Camagüey, Cuba. Tesis PhD en ciencia agrícolas, Instituto de Investigaciones para las Ciencias del Suelo y la Agroquímica de la Academia de Ciencias de Hungría. Recuperada de <http://usi.earth.ac.cr/glas/sp/50000121.pdf>
- González, A.; Figueroa, U.; Preciado, P.; Núñez, G.; Guadalupe, J.; Antuna, O. (2016). Uso eficiente y recuperación aparente de nitrógeno en maíz forrajero en suelos diferentes. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 7(2):301-309. <http://www.scielo.org.mx/pdf/remexca/v7n2/2007-0934-remexca-7-02-00301-en.pdf>
- Gordillo R., Á. J. (2010). Estudio del proceso de mineralización de un abono orgánico en suelo para el cultivo ecológico de algodón. https://idus.us.es/bitstream/handle/11441/49372/pfc_angel_j_gordillo_rivero.pdf;jsessionid=C4745F966703FD593929FC838D7B84ED?sequence=1
- Gostincar, J. (2007). Componentes sólidos del suelo. En J. Lorente. Biblioteca de la agricultura (p. 25-26). Barcelona, España: Lexus.
- Hidalgo, E. (2013). Manejo técnico del cultivo del maíz amarillo duro en la región San Martín. INIA, (02)13: 8-12.
- Hinostroza, A.; Malca, J.; Suarez, L. (2013). Dinámica de la biomasa microbiana y su relación con la respiración y el nitrógeno del suelo en tierras agrícolas en el valle del Mantaro. *Ciencia y desarrollo* 16(1): 19.
- Ibrahim, S.; Hala, K. (2013). Yield and chemical constituents of corn (*Zea mays* L.) As Affected by Nitrogen and Phosphors Fertilization under Different Irrigation Intervals. *Journal of Applied Sciences Research*, 3(10): 1112-1120.

- Krebs, L. (2003). Respiración del suelo como herramienta para evaluar calidad de fondos en acuicultura (Tesis de maestría, Escuela Politécnica del Litoral). Recuperada de <https://www.dspace.espol.edu.ec/bitstream/123456789/8666/1/lkrebs.pdf>
- La República. (26 de junio de 2019). Perú ocupa el cuarto puesto en producción de pollos en Latinoamérica. La República. Recuperada de <https://larepublica.pe/economia/2019/06/26/peru-ocupa-el-cuarto-puesto-en-produccion-de-pollos-en-latinoamerica/>
- Li, L.L.; Li, S.T. (2014). Nitrogen mineralization from animal manures and its relation to organic N fractions. *Journal of Integrative Agriculture*, 13 (9): 2040-2048.
- Linn, D.M.; Doran, J.W. (1984). Effect of water-filled pore space on carbon dioxide and nitrous oxide production in tilled and nontilled soils. *Soil Science Society of America Journal*, 48: 1267-1272. <https://pubag.nal.usda.gov/download/16745/PDF>
- Maisonnave, R.; Lamelas, K.; Mair, G.; Rodríguez, N. (2019). Consulta rápida. Caracterización físico química del guano de gallinas ponedoras de granjas del noreste de la provincia de Buenos Aires. Buenos Aires, Argentina. Recuperada de https://www.agroindustria.gob.ar/sitio/areas/aves/informes/otros/_archivos//190430_Valor%20Agronomico%20Guano%20gallina%202019.pdf
- McNeill, A.; Unkovich, M. (2007). The nitrogen cycle in terrestrial ecosystems. In Marschner, P.; Rengel, Z. (Eds.). *The nitrogen cycle in terrestrial ecosystems* Berlin (pp. 37–64). Alemania: Springer Verlag.
- Mengel, K.; Kirkby, E.A. (1987). Principios de nutrición vegetal. Recuperado de <https://www.ipipotash.org/uploads/udocs/64-principios-de-nutricion-vegetal.pdf>
- Michael, C. (s.f.). Gestión de residuos de aves de corral en los países en desarrollo. Recuperada de <http://www.fao.org/3/al718s/al718s00.pdf>
- Monsalve, C.; Gutiérrez, D.; J.S.; Cardona, W.A. (2017). Factores que intervienen en el proceso de mineralización de nitrógeno cuando son aplicadas enmiendas orgánicas al suelo. Una revisión. *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas*, 11(1), 200–209. <https://doi.org/10.17584/rcch.2017v11i1.5663>
- Navarro, G.; Navarro, G. (2003). Química agrícola: el suelo y los elementos químicos esenciales para la vida vegetal (2º ed.). España, Madrid: Mundi prensa.

- Oropeza, K.K. (2018). Aporte de nutrientes de la biomasa vegetal de tres árboles nativos utilizados en sistemas agroforestales y su contribución para la producción agroforestal del caserío san Ildefonso de Llanqui, provincia de Aija (Tesis de ingeniero). Universidad Nacional Santiago Antúnez de Mayolo, Huaraz.
- Perdomo, C.; Barbazán, M.; Durán, J. (2007). Area de suelo y agua cátedra de fertilidad - nitrógeno. <http://www.fagro.edu.uy/~fertilidad/publica/Tomo N.pdf>.
- R Core Team (2020). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. ISBN 3-900051-07-0, URL <http://www.R-project.org/>.
- Reddy, K.R.; Rao, P.S.C.; Jup, R.E. (1982). The effect of carbon mineralization on denitrification kinetics in mineral and organic soils. *Soil Science Society of America Journal*, 46(03 pp. 62-68.
- Ramos-Lara, C., Alcántar-González, G. Galvis-Spinola A., Peña-Lomelí A.; Martínez-Garza. A. 2002. Eficiencia en el uso del nitrógeno en tomate de cáscara en fertirriego. *Terra Latinoamericana*, 20: 465-468.
- Rico, S.A. (2013). Determinación de la eficiencia en el uso del nitrógeno en variedades de olivo y su interacción con el tipo de suelo. <https://helvia.uco.es/xmlui/bitstream/handle/10396/12797/Tesis-%20Sergio%20Almeida.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Salazar, E.; Beltrán, A.; Fortis, M.; Leos, J.A.; Cueto, J.A.; Vázquez, C. (2003). Mineralización de nitrógeno en el suelo y producción de maíz forrajero con tres sistemas de labranza. *Terra Latinoamericana*, 21(4). Recuperada de <https://www.redalyc.org/pdf/573/57321413.pdf>
- Sosa, N.; Orrcellet, J.M.; Gambaudo, S. (2016). Uso agronómico de residuos orgánicos de origen animal. [http://www.ipni.net/publication/ia-lacs.nsf/0/C44F831ADA767B1C03258022004C5097/\\$FILE/14.pdf](http://www.ipni.net/publication/ia-lacs.nsf/0/C44F831ADA767B1C03258022004C5097/$FILE/14.pdf)
- Tarigo, A.; Repetto, C.; Acosta, D. (2004). Evaluación agronómica de biofertilizantes en la producción de lechuga (*Lactuca sativa*) a campo, Uruguay (Tesis de Ingeniero). Recuperada de <http://biblioteca.fagro.edu.uy/iah/textostesis/2004/3171tar1.pdf>
- Talledo, E.F.; Chávez, D.R. (2014). Determinación de harina de sangre como extensor cárnico y temperaturas de escaldado en el valor proteico y aceptabilidad de una

mortadela (Tesis de ingeniero, Escuela Superior Politécnica Agropecuaria de Manabí Manuel Félix López). Recuperada de <http://repositorio.espam.edu.ec/bitstream/42000/437/1/TESIS%20-DETERMINACION%20DE%20HARINA%20DE%20SANGRE%20COMO%20EXTENSOR%20CARNICO%20Y%20TEMPERATURAS%20DE%20ESCALDADO%20EN%20EL%20.pdf>

Uicab, L.A.; Sandoval, C.A. (2003). Uso de contenido ruminal y algunos residuos de la industria cárnica en la elaboración de composta, 2(2). Recuperada de <https://www.redalyc.org/pdf/939/93912118001.pdf>

VIII. ANEXOS

Anexo 1: Curvas de calibración de nitrato y amonio

a. Curva de calibración de N-NO₃ en 100 ml agua destilada

Concentración de las soluciones a preparar (mg N L ⁻¹)	Alícuota desde la solución de 100 mg N L ⁻¹ (mL)
0	0
2	2
4	4
6	6
8	8
10	10

b. Curva de calibración de N-NH₄ en 100 ml de agua destilada

Concentración de las soluciones a preparar (mg N L ⁻¹)	Alícuota desde la solución de 100 mg N L ⁻¹ (mL)
0	0
5	5
10	10
15	15
20	20
25	25
30	30

Anexo 2. Tabla de datos de parámetros en planta de maíz medidos al final de la investigación

Tratamiento	Altura de plantas (cm)	Peso seco follaje (g)	Peso seco raíz (g)
Testigo	108.20	56.94	15.46
Testigo	125.90	60.29	12.02
Testigo	129.70	66.68	14.61
Testigo	116.90	70.51	12.21
Harina de sangre	99.90	66.55	11.87
Harina de sangre	138.50	67.97	9.30
Harina de sangre	122.10	65.75	9.65
Harina de sangre	113.30	64.35	10.05
DAF	132.80	61.97	7.94
DAF	119.00	71.11	9.07
DAF	106.10	61.99	11.17
DAF	116.40	58.28	11.33
Fert. Inorgánica	136.20	74.48	18.31
Fert. Inorgánica	115.50	64.66	20.32
Fert. Inorgánica	104.60	75.61	24.52
Fert. Inorgánica	132.30	80.38	18.68
Formulación 1	100.10	72.17	15.31
Formulación 1	132.90	80.51	13.68
Formulación 1	128.20	81.53	12.05
Formulación 1	135.90	87.77	11.89
Formulación 2	123.80	74.96	13.09
Formulación 2	95.50	74.58	15.05
Formulación 2	97.40	73.55	12.83
Formulación 2	130.70	73.37	19.15
Formulación 3	113.10	65.07	13.26
Formulación 3	147.80	92.57	11.96
Formulación 3	114.60	71.51	12.27
Formulación 3	146.00	89.36	11.44
Formulación 4	118.30	74.18	14.86
Formulación 4	114.40	75.04	13.51
Formulación 4	132.30	82.33	15.04
Formulación 4	117.60	71.84	11.13

Anexo 3. Tabla de datos N-nítrico acumulado, evaluado cada 15 días

Tratamiento	Día 0	Día 15	Día 30	Día 45	Día 60	Día 75	Día 90
Testigo	5.27	72.93	74.73	95.90	104.91	104.91	104.61
Testigo	5.27	73.76	76.29	92.79	105.12	100.90	105.18
Testigo	5.27	72.93	74.29	95.74	94.99	104.01	106.59
Testigo	5.27	73.76	75.81	91.78	95.19	102.11	103.82
Harina de sangre	1.8	73.89	124.09	143.71	173.65	252.08	298.31
Harina de sangre	1.8	75.39	124.53	194.02	183.64	253.64	297.87
Harina de sangre	1.8	75.31	122.08	188.72	259.57	251.98	299.32
Harina de sangre	1.8	75.64	125.19	183.43	233.60	254.67	298.22
DAF	0	55.63	129.11	208.00	313.33	341.45	400.56
DAF	0	54.72	130.11	210.12	337.31	339.22	402.89
DAF	0	55.72	131.11	208.53	273.36	337.98	402.57
DAF	0	55.80	128.17	167.75	229.40	336.89	402.89
Formulación 1	7.44	67.16	113.58	118.48	255.93	303.79	343.57
Formulación 1	7.44	67.08	112.79	116.36	249.94	302.75	343.78
Formulación 1	7.44	66.58	112.45	122.72	375.83	302.34	344.57
Formulación 1	7.44	66.91	112.09	124.31	239.94	301.83	342.78
Formulación 2	7.03	53.62	108.30	114.66	420.20	381.96	394.46
Formulación 2	7.03	54.04	106.86	107.88	124.46	382.20	393.96
Formulación 2	7.03	53.95	108.75	109.89	464.16	380.31	395.86
Formulación 2	7.03	53.95	106.95	110.95	258.34	380.97	393.30
Formulación 3	7.82	51.41	119.17	107.51	161.63	479.18	492.41
Formulación 3	7.82	51.99	119.49	109.10	457.38	480.30	493.30
Formulación 3	7.82	52.16	118.41	104.86	373.45	480.09	491.85
Formulación 3	7.82	51.66	118.17	109.63	643.21	481.07	425.18
Formulación 4	8.26	50.30	105.80	98.60	365.02	394.17	423.53
Formulación 4	8.26	50.47	105.63	90.66	325.05	393.08	425.51
Formulación 4	8.26	50.55	106.43	94.89	369.01	390.75	424.40
Formulación 4	8.26	50.38	105.92	91.71	349.03	393.86	424.63
Desviación estándar	3.06	9.92	16.75	40.81	130.29	113.50	115.21
Promedio	5.37	60.99	110.58	129.02	279.88	321.73	349.14
C.V. (%)	56.84	16.26	15.15	31.63	46.55	35.28	33.00

Anexo 4. Tabla de datos de N-amoniaco acumulado, evaluado cada 15 días

Tratamiento	Día 0	Día 15	Día 30	Día 45	Día 60	Día 75	Día 90
Testigo	29.4	-6.16	-6.62	-5.51	-14.17	-20.14	-20.40
Testigo	29.4	-4.01	-5.53	-9.59	-13.89	-20.17	-20.62
Testigo	29.4	-3.17	-5.28	-5.51	-14.31	-20.18	-20.71
Testigo	29.4	-3.14	-5.63	-1.02	-14.31	-20.21	-20.73
Harina de sangre	41.1	70.57	48.46	44.87	-2.30	-18.20	-19.34
Harina de sangre	41.1	66.38	46.92	32.62	-3.27	-18.08	-19.32
Harina de sangre	41.1	65.97	48.06	35.07	-0.35	-18.02	-19.10
Harina de sangre	41.1	64.14	49.12	31.39	-2.30	-20.77	-19.20
DAF	10.4	51.84	35.38	10.22	15.71	9.72	7.52
DAF	10.4	48.90	34.78	15.13	16.72	9.49	7.79
DAF	10.4	53.28	35.92	26.56	16.05	10.60	7.48
DAF	10.4	49.08	33.60	21.25	14.83	9.94	7.15
Formulación 1	50.22	29.36	6.89	-14.08	-32.87	-33.33	-35.33
Formulación 1	50.22	27.12	6.34	-17.75	-30.92	-33.90	-35.22
Formulación 1	50.22	27.55	7.56	-18.16	-27.02	-33.21	-35.66
Formulación 1	50.22	29.43	6.67	-21.84	-27.02	-33.34	-35.10
Formulación 2	51.31	41.26	27.25	-5.36	-30.06	-28.53	-30.18
Formulación 2	51.31	45.47	26.68	2.80	-27.13	-28.27	-30.97
Formulación 2	51.31	63.74	27.08	-8.22	-26.16	-29.42	-30.42
Formulación 2	51.31	69.77	27.80	4.44	-23.23	-28.34	-30.10
Formulación 3	57.71	16.32	-2.80	-34.23	-38.41	-39.84	-41.69
Formulación 3	57.71	16.16	-4.53	-41.99	-36.46	-40.02	-42.28
Formulación 3	57.71	16.98	-2.32	-24.42	-34.51	-39.60	-41.70
Formulación 3	57.71	23.47	-4.01	-21.57	-33.53	-39.83	-42.48
Formulación 4	68.47	-14.46	-20.24	-27.42	-33.57	-34.03	-36.69
Formulación 4	68.47	-13.60	-21.25	-31.92	-34.54	-35.48	-36.25
Formulación 4	68.47	-12.98	-18.44	-22.93	-29.67	-34.89	-36.66
Formulación 4	68.47	-12.43	-20.07	-26.61	-30.64	-33.92	-37.15
Desviación estándar	18.17	29.19	23.31	23.51	17.86	15.72	15.73
Promedio	44.09	28.82	12.56	-4.06	-17.76	-23.64	-25.26
C.V. (%)	41.22	101.31	185.52	-578.50	-100.56	-66.49	-62.27

Anexo 5. Tabla de datos de N-Mineral acumulado (N-nítrico + N-amoniaco)

Tratamiento	Día 0	Día 15	Día 30	Día 45	Día 60	Día 75	Día 90
Testigo	34.67	66.76	68.11	90.39	90.74	84.77	84.21
Testigo	34.67	69.75	70.76	83.20	91.23	80.73	84.56
Testigo	34.67	69.76	69.01	90.23	80.68	83.83	85.88
Testigo	34.67	70.62	70.18	90.76	80.88	81.90	83.09
Harina de sangre	42.9	144.46	172.55	188.58	171.35	233.88	278.97
Harina de sangre	42.9	141.78	171.45	226.64	180.37	235.56	278.55
Harina de sangre	42.9	141.28	170.14	223.79	259.22	233.96	280.22
Harina de sangre	42.9	139.78	174.31	214.82	231.30	233.90	279.02
DAF	10.4	107.48	164.49	218.22	329.04	351.17	408.08
DAF	10.4	103.61	164.89	225.24	354.03	348.71	410.68
DAF	10.4	109.00	167.03	235.09	289.41	348.58	410.05
DAF	10.4	104.88	161.77	189.01	244.23	346.83	410.04
Formulación 1	57.66	96.52	120.47	104.41	223.06	270.46	308.24
Formulación 1	57.66	94.20	119.13	98.61	219.02	268.85	308.56
Formulación 1	57.66	94.13	120.01	104.56	348.81	269.13	308.91
Formulación 1	57.66	96.34	118.76	102.47	212.93	268.49	307.68
Formulación 2	58.34	94.88	135.55	109.29	390.14	353.43	364.28
Formulación 2	58.34	99.50	133.54	110.68	97.32	353.93	362.99
Formulación 2	58.34	117.69	135.83	101.67	438.00	350.89	365.44
Formulación 2	58.34	123.72	134.75	115.39	235.11	352.63	363.20
Formulación 3	65.53	67.73	116.37	73.28	123.23	439.34	450.72
Formulación 3	65.53	68.15	114.96	67.11	420.92	440.28	451.02
Formulación 3	65.53	69.14	116.09	80.44	338.94	440.49	450.15
Formulación 3	65.53	75.13	114.16	88.06	609.68	441.24	382.70
Formulación 4	76.73	35.84	85.56	71.17	331.45	360.14	386.84
Formulación 4	76.73	36.87	84.38	58.74	290.51	357.60	389.26
Formulación 4	76.73	37.57	87.99	71.96	339.34	355.86	387.74
Formulación 4	76.73	37.95	85.85	65.11	318.39	359.94	387.48
Desviación estándar	20.85	32.51	35.68	60.46	126.01	109.33	112.58
Promedio	49.46	89.80	123.15	124.96	262.12	298.09	323.88
C.V. (%)	42.16	36.20	28.97	48.38	48.07	36.68	34.76

Anexo 6. Tabla de datos de N-Nítrico neto

Tratamiento	Día 15	Día 30	Día 45	Día 60	Día 75	Día 90
Harina de sangre	0.55	48.81	49.66	73.60	149.10	193.26
Harina de sangre	2.05	49.25	99.97	83.59	150.66	192.82
Harina de sangre	1.97	46.80	94.67	159.52	149.00	194.27
Harina de sangre	2.30	49.91	89.38	133.55	151.69	193.17
DAF	-17.72	53.83	113.95	213.28	238.47	295.51
DAF	-18.63	54.83	116.07	237.26	236.24	297.84
DAF	-17.63	55.83	114.48	173.31	235.00	297.52
DAF	-17.55	52.89	73.70	129.35	233.91	297.84
Formulación 1	-6.18	38.30	24.43	155.88	200.81	238.52
Formulación 1	-6.26	37.51	22.31	149.89	199.77	238.73
Formulación 1	-6.76	37.17	28.67	275.78	199.36	239.52
Formulación 1	-6.43	36.81	30.26	139.89	198.85	237.73
Formulación 2	-19.73	33.02	20.61	320.15	278.98	289.41
Formulación 2	-19.31	31.58	13.83	24.41	279.22	288.91
Formulación 2	-19.40	33.47	15.84	364.11	277.33	290.81
Formulación 2	-19.40	31.67	16.90	158.29	277.99	288.25
Formulación 3	-21.94	43.89	13.46	61.58	376.20	387.36
Formulación 3	-21.36	44.21	15.05	357.33	377.32	388.25
Formulación 3	-21.19	43.13	10.81	273.40	377.11	386.80
Formulación 3	-21.69	42.89	15.58	543.16	378.09	320.13
Formulación 4	-23.05	30.52	4.55	264.97	291.19	318.48
Formulación 4	-22.88	30.35	-3.39	225.00	290.10	320.46
Formulación 4	-22.80	31.15	0.84	268.96	287.77	319.35
Formulación 4	-22.97	30.64	-2.34	248.98	290.88	319.58
Desviación estándar	9.19	8.75	41.30	115.60	73.58	59.10
Promedio	-14.42	41.19	40.80	209.80	255.21	284.77
C.V. (%)	-63.74	21.25	101.23	55.10	28.83	20.75

Anexo 7. Tabla de datos de N-Amoniacal neto

Tratamiento	Día 15	Día 30	Día 45	Día 60	Día 75	Día 90
Harina de sangre	74.69	54.23	50.28	11.87	1.98	1.28
Harina de sangre	70.50	52.69	38.03	10.90	2.10	1.30
Harina de sangre	70.09	53.83	40.48	13.82	2.16	1.52
Harina de sangre	68.26	54.89	36.80	11.87	-0.60	1.42
DAF	55.96	41.15	15.63	29.88	29.90	28.14
DAF	53.02	40.55	20.54	30.89	29.67	28.41
DAF	57.40	41.69	31.97	30.22	30.78	28.10
DAF	53.20	39.37	26.66	29.00	30.12	27.77
Formulación 1	33.48	12.66	-8.67	-18.70	-13.15	-14.71
Formulación 1	31.24	12.11	-12.34	-16.75	-13.72	-14.60
Formulación 1	31.67	13.33	-12.75	-12.85	-13.03	-15.04
Formulación 1	33.55	12.44	-16.43	-12.85	-13.16	-14.48
Formulación 2	45.38	33.01	0.05	-15.89	-8.36	-9.57
Formulación 2	49.59	32.44	8.21	-12.96	-8.10	-10.36
Formulación 2	67.86	32.84	-2.81	-11.99	-9.25	-9.81
Formulación 2	73.89	33.56	9.85	-9.06	-8.17	-9.49
Formulación 3	20.44	2.97	-28.82	-24.24	-19.66	-21.07
Formulación 3	20.28	1.24	-36.58	-22.29	-19.84	-21.66
Formulación 3	21.10	3.45	-19.01	-20.34	-19.42	-21.08
Formulación 3	27.59	1.76	-16.16	-19.36	-19.65	-21.86
Formulación 4	-10.34	-14.48	-22.01	-19.40	-13.86	-16.08
Formulación 4	-9.48	-15.49	-26.51	-20.37	-15.31	-15.64
Formulación 4	-8.86	-12.68	-17.52	-15.50	-14.72	-16.05
Formulación 4	-8.31	-14.31	-21.20	-16.47	-13.75	-16.54
Desviación estándar	27.93	23.87	25.43	19.28	16.96	16.92
Promedio	38.43	21.38	1.57	-4.19	-4.04	-5.42
C.V. (%)	72.68	111.61	1621.50	-460.25	-419.37	-311.97

Anexo 8. Tabla de datos de N-Mineral neto

Tratamiento	Día 15	Día 30	Día 45	Día 60	Día 75	Día 90
Harina de sangre	75.24	103.04	99.94	85.47	151.07	194.54
Harina de sangre	72.56	101.94	138.00	94.49	152.75	194.12
Harina de sangre	72.06	100.63	135.15	173.34	151.15	195.79
Harina de sangre	70.56	104.80	126.18	145.42	151.09	194.59
DAF	38.26	94.98	129.58	243.16	268.36	323.65
DAF	34.39	95.38	136.60	268.15	265.90	326.25
DAF	39.78	97.52	146.45	203.53	265.77	325.62
DAF	35.66	92.26	100.37	158.35	264.02	325.61
Formulación 1	27.30	50.96	15.77	137.18	187.65	223.81
Formulación 1	24.98	49.62	9.97	133.14	186.04	224.13
Formulación 1	24.91	50.50	15.92	262.93	186.32	224.48
Formulación 1	27.12	49.25	13.83	127.05	185.68	223.25
Formulación 2	25.66	66.03	20.64	304.26	270.62	279.84
Formulación 2	30.28	64.02	22.03	11.44	271.12	278.55
Formulación 2	48.47	66.31	13.02	352.12	268.08	281.00
Formulación 2	54.50	65.23	26.74	149.23	269.82	278.76
Formulación 3	-1.49	46.86	-15.36	37.35	356.54	366.29
Formulación 3	-1.07	45.45	-21.53	335.04	357.48	366.59
Formulación 3	-0.08	46.58	-8.20	253.06	357.69	365.72
Formulación 3	5.91	44.65	-0.58	523.80	358.44	298.27
Formulación 4	-33.39	16.04	-17.48	245.56	277.33	302.40
Formulación 4	-32.36	14.86	-29.91	204.62	274.79	304.82
Formulación 4	-31.66	18.47	-16.69	253.45	273.05	303.30
Formulación 4	-31.28	16.33	-23.54	232.50	277.13	303.04
Desviación estándar	33.98	30.18	63.41	111.05	68.03	56.98
Promedio	24.01	62.57	42.37	205.61	251.16	279.35
C.V. (%)	141.51	48.23	149.67	54.01	27.09	20.40

Anexo 9. Tabla de datos de respiración del suelo (mg C kg⁻¹ de suelo)

Tratamiento	15 d	30 d	45 d	60 d	75 d	90 d
Testigo	104.50	327.74	440.54	546.29	771.35	1021.95
Testigo	104.50	323.11	423.72	539.78	742.95	970.24
Testigo	97.90	309.57	405.30	513.63	733.22	948.85
Testigo	106.70	325.31	433.24	559.62	768.26	983.89
Harina de sangre	133.10	351.71	486.47	638.64	874.64	1142.72
Harina de sangre	122.10	361.53	469.46	603.57	834.11	1102.19
Harina de sangre	146.30	394.99	556.57	682.95	905.27	1115.08
Harina de sangre	146.30	378.79	547.69	679.23	904.29	1114.09
DAF	192.50	457.38	562.87	676.35	887.73	1155.81
DAF	216.70	495.46	671.68	795.48	979.49	1276.71
DAF	199.10	477.86	656.52	806.11	1031.17	1278.85
DAF	190.30	473.69	606.00	776.23	1028.65	1290.90
Fert. Inorgánica	137.50	356.11	483.55	620.25	891.82	1151.16
Fert. Inorgánica	190.30	432.05	586.31	735.90	1004.75	1258.26
Fert. Inorgánica	126.50	352.05	525.83	685.74	960.05	1222.31
Fert. Inorgánica	115.50	359.56	494.31	646.48	912.59	1157.36
Formulación 1	168.30	430.87	602.21	756.96	1014.85	1253.79
Formulación 1	188.10	432.16	603.50	760.83	1032.41	1291.74
Formulación 1	289.30	565.75	710.26	862.43	1128.53	1393.70
Formulación 1	161.70	410.39	552.46	699.47	971.05	1227.47
Formulación 2	157.30	415.24	596.34	722.71	975.14	1243.22
Formulación 2	159.50	389.68	546.39	654.71	923.55	1177.06
Formulación 2	161.70	417.33	635.01	763.97	1030.07	1309.81
Formulación 2	161.70	405.76	601.49	779.45	1056.50	1330.41
Formulación 3	172.70	419.07	614.80	725.71	1000.02	1273.93
Formulación 3	168.30	410.05	588.70	764.09	1043.87	1317.78
Formulación 3	161.70	405.76	606.37	722.43	994.01	1270.83
Formulación 3	192.50	466.63	655.05	765.95	1045.74	1307.99
Formulación 4	150.70	392.45	610.13	772.61	1107.13	1381.04
Formulación 4	150.70	401.70	590.11	778.39	1134.80	1417.44
Formulación 4	177.10	430.41	616.39	776.29	1129.96	1406.78
Formulación 4	168.30	444.75	603.89	740.59	1061.42	1320.76
Desviación estándar	38.54	55.85	76.29	85.96	111.40	125.81
Promedio	159.98	406.71	565.10	704.78	964.98	1222.32
C.V. (%)	24.09	13.73	13.50	12.20	11.54	10.29

Anexo 10. Tabla de datos totales del porcentaje de N en follaje y N extraído (g/maceta)

Tratamiento	Peso seco follaje (g/maceta)	N en follaje (%)	N extraído (g/maceta)
Testigo	56.94	0.84	47.83
Testigo	60.29	0.87	52.45
Testigo	66.68	0.7	46.68
Testigo	70.51	0.7	49.36
Harina de sangre	66.55	1.76	117.13
Harina de sangre	67.97	1.74	118.27
Harina de sangre	65.75	1.65	108.49
Harina de sangre	64.35	1.76	113.26
DAF	61.97	1.26	78.08
DAF	71.11	0.76	54.04
DAF	61.99	1.4	86.79
DAF	58.28	1.82	106.07
Fert. Inorgánica	74.48	1.09	81.18
Fert. Inorgánica	64.66	1.23	79.53
Fert. Inorgánica	75.61	1.29	97.54
Fert. Inorgánica	80.38	1.15	92.44
Formulación 1	72.17	1.54	111.14
Formulación 1	80.51	1.65	132.84
Formulación 1	81.53	1.29	105.17
Formulación 1	87.77	1.26	110.59
Formulación 2	74.96	1.37	102.7
Formulación 2	74.58	1.54	114.85
Formulación 2	73.55	1.48	108.85
Formulación 2	73.37	1.4	102.72
Formulación 3	65.07	1.26	81.99
Formulación 3	92.57	1.09	100.9
Formulación 3	71.51	1.23	87.96
Formulación 3	89.36	1.15	102.76
Formulación 4	74.18	1.26	93.47
Formulación 4	75.04	1.09	81.79
Formulación 4	82.33	1.12	92.21
Formulación 4	71.84	1.18	84.77

Anexo 11. Tabla de datos de pH, evaluado cada 15 días

Tratamiento	Dia 30	Dia 45	Dia 60	Dia 75	Dia 90
Testigo	5.04	4.98	4.94	4.92	5.11
Testigo	5.08	5.07	4.95	4.96	5.11
Testigo	5.01	5.03	5.08	4.96	5.16
Testigo	5.03	5.12	4.98	4.92	5.16
Harina de sangre	5.29	5.11	4.73	4.74	4.80
Harina de sangre	5.29	5.07	4.78	4.78	4.88
Harina de sangre	5.25	5.02	4.8	4.78	4.8
Harina de sangre	5.29	5.03	4.77	4.69	4.80
DAF	5.25	5.07	4.82	4.87	5.11
DAF	5.25	5.03	4.82	4.87	4.97
DAF	5.24	5.07	4.87	4.83	4.98
DAF	5.25	5.11	4.82	4.87	5.00
Fert. Inorgánica	5.04	5.03	5.02	5.12	5.07
Fert. Inorgánica	5.00	4.98	5.00	5.12	5.07
Fert. Inorgánica	5.08	5.03	5.05	4.97	5.10
Fert. Inorgánica	5.08	5.02	5.03	5.12	5.21
Formulación 1	5.43	5.21	4.84	4.83	4.91
Formulación 1	5.55	5.15	4.91	4.92	5.02
Formulación 1	5.45	5.38	4.91	4.96	5.07
Formulación 1	5.45	5.07	4.91	4.92	5.07
Formulación 2	5.37	5.12	4.86	4.92	5.07
Formulación 2	5.41	5.21	4.86	4.87	4.94
Formulación 2	5.45	5.16	4.82	4.83	4.97
Formulación 2	5.33	5.21	4.86	4.83	5.07
Formulación 3	5.33	5.07	4.91	4.96	5.16
Formulación 3	5.41	5.12	4.96	5.01	5.19
Formulación 3	5.33	5.25	4.91	4.92	5.11
Formulación 3	5.45	5.25	4.94	4.90	5.16
Formulación 4	5.41	5.21	4.91	4.96	5.24
Formulación 4	5.25	5.12	4.96	4.96	5.15
Formulación 4	5.33	5.15	4.98	5.01	5.2
Formulación 4	5.33	5.23	5.01	4.96	5.16

Anexo 12. Resultados de gramos de N extraído y % de N extraído

Tratamiento	Peso seco follaje (g)	Nitrógeno (%)	N extraído (g)	N extraído (%)
Testigo	56.94	0.84	47.83	0.478
Testigo	60.29	0.87	52.45	0.525
Testigo	66.68	0.70	46.68	0.467
Testigo	70.51	0.70	49.36	0.494
Harina de sangre	66.55	1.76	117.13	1.171
Harina de sangre	67.97	1.74	118.27	1.183
Harina de sangre	65.75	1.65	108.49	1.085
Harina de sangre	64.35	1.76	113.26	1.133
DAF	61.97	1.26	78.08	0.781
DAF	71.11	0.76	54.04	0.540
DAF	61.99	1.40	86.79	0.868
DAF	58.28	1.82	106.07	1.061
Fert. Inorgánica	74.48	1.09	81.18	0.812
Fert. Inorgánica	64.66	1.23	79.53	0.795
Fert. Inorgánica	75.61	1.29	97.54	0.975
Fert. Inorgánica	80.38	1.15	92.44	0.924
Formulación 1	72.17	1.54	111.14	1.111
Formulación 1	80.51	1.65	132.84	1.328
Formulación 1	81.53	1.29	105.17	1.052
Formulación 1	87.77	1.26	110.59	1.106
Formulación 2	74.96	1.37	102.70	1.027
Formulación 2	74.58	1.54	114.85	1.149
Formulación 2	73.55	1.48	108.85	1.089
Formulación 2	73.37	1.40	102.72	1.027
Formulación 3	65.07	1.26	81.99	0.820
Formulación 3	92.57	1.09	100.90	1.009
Formulación 3	71.51	1.23	87.96	0.880
Formulación 3	89.36	1.15	102.76	1.028
Formulación 4	74.18	1.26	93.47	0.935
Formulación 4	75.04	1.09	81.79	0.818
Formulación 4	82.33	1.12	92.21	0.922
Formulación 4	71.84	1.18	84.77	0.848

Anexo 13: Prueba de Tukey para amonio acumulado al día 90 de la evaluación

```

          Df Sum Sq. Mean Sq F value Pr(>F)
Trat      6   6664  1110.6    2615 <2e-16 ***
Residuals 21      9    0.4
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

          Simultaneous Tests for General Linear Hypotheses

          Multiple Comparisons of Means: Tukey Contrasts

Fit: aov(formula = Resultado_90d ~ Trat)

Linear Hypotheses:
          Estimate std. Error  t value Pr(>|t|)
FORM 1 - DAF == 0      -43.3825    0.4608  -94.139 <0.001 ***
FORM 2 - DAF == 0      -38.5775    0.4608  -83.712 <0.001 ***
FORM 3 - DAF == 0      -49.7600    0.4608 -107.978 <0.001 ***
FORM 4 - DAF == 0      -44.5175    0.4608  -96.602 <0.001 ***
HS - DAF == 0          -28.7050    0.4608  -62.289 <0.001 ***
T - DAF == 0           -30.1125    0.4608  -65.344 <0.001 ***
FORM 2 - FORM 1 == 0     4.8050    0.4608   10.427 <0.001 ***
FORM 3 - FORM 1 == 0    -6.3775    0.4608  -13.839 <0.001 ***
FORM 4 - FORM 1 == 0    -1.1350    0.4608   -2.463  0.2226
HS - FORM 1 == 0        14.6775    0.4608   31.850 <0.001 ***
T - FORM 1 == 0         13.2700    0.4608   28.796 <0.001 ***
FORM 3 - FORM 2 == 0   -11.1825    0.4608  -24.266 <0.001 ***
FORM 4 - FORM 2 == 0    -5.9400    0.4608  -12.890 <0.001 ***
HS - FORM 2 == 0        9.8725    0.4608   21.423 <0.001 ***
T - FORM 2 == 0         8.4650    0.4608   18.369 <0.001 ***
FORM 4 - FORM 3 == 0     5.2425    0.4608   11.376 <0.001 ***
HS - FORM 3 == 0       21.0550    0.4608   45.689 <0.001 ***
T - FORM 3 == 0        19.6475    0.4608   42.635 <0.001 ***
HS - FORM 4 == 0       15.8125    0.4608   34.313 <0.001 ***
T - FORM 4 == 0        14.4050    0.4608   31.259 <0.001 ***
T - HS == 0            -1.4075    0.4608   -3.054  0.0749 .
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
(Adjusted p values reported -- single-step method)

```

Donde: T0 (T), T1 (HS), T2 (DAF), T3 (FI), T4 (Form1), T5 (Form 2), T6 (Form 3), T7 (Form 4).

Anexo 14: Prueba de Tukey para amonio neto al día 90 de la evaluación

```

          Df Sum Sq Mean Sq F value Pr(>F)
Trat      5   6581  1316.1   13341 <2e-16 ***
Residuals 18      2    0.1
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

      Simultaneous Tests for General Linear Hypotheses

      Multiple Comparisons of Means: Tukey Contrasts

Fit: aov(formula = Resultado_90d ~ Trat)

Linear Hypotheses:
          Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
FORM 1 - DAF == 0    -42.8125    0.2221  -192.764 < 1e-04 ***
FORM 2 - DAF == 0    -37.9125    0.2221  -170.701 < 1e-04 ***
FORM 3 - DAF == 0    -49.5225    0.2221  -222.975 < 1e-04 ***
FORM 4 - DAF == 0    -44.1825    0.2221  -198.932 < 1e-04 ***
HS - DAF == 0        -26.7250    0.2221  -120.329 < 1e-04 ***
FORM 2 - FORM 1 == 0    4.9000    0.2221   22.062 < 1e-04 ***
FORM 3 - FORM 1 == 0   -6.7100    0.2221  -30.212 < 1e-04 ***
FORM 4 - FORM 1 == 0   -1.3700    0.2221   -6.168 0.000103 ***
HS - FORM 1 == 0       16.0875    0.2221   72.434 < 1e-04 ***
FORM 3 - FORM 2 == 0  -11.6100    0.2221  -52.274 < 1e-04 ***
FORM 4 - FORM 2 == 0   -6.2700    0.2221  -28.231 < 1e-04 ***
HS - FORM 2 == 0       11.1875    0.2221   50.372 < 1e-04 ***
FORM 4 - FORM 3 == 0    5.3400    0.2221   24.043 < 1e-04 ***
HS - FORM 3 == 0       22.7975    0.2221  102.646 < 1e-04 ***
HS - FORM 4 == 0       17.4575    0.2221   78.602 < 1e-04 ***
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
(Adjusted p values reported -- single-step method)

```

Donde: T0 (T), T1 (HS), T2 (DAF), T3 (FI), T4 (Form1), T5 (Form 2), T6 (Form 3), T7 (Form 4).

Anexo 15: Prueba de Kruskal-wallis para nitrato acumulado al día 90 de la evaluación

```

Kruskal-wallis rank sum test

data: Resultado_90d by Trat
Kruskal-wallis chi-squared = 26.379, df = 6, p-value = 0.0001892

Multiple comparison test after Kruskal-wallis
p.value: 0.05
Comparisons

```

	obs.dif	critical.dif	difference
DAF-FORM 1	8.00	17.67139	FALSE
DAF-FORM 2	4.00	17.67139	FALSE
DAF-FORM 3	7.75	17.67139	FALSE
DAF-FORM 4	4.25	17.67139	FALSE
DAF-HS	12.00	17.67139	FALSE
DAF-T	16.00	17.67139	FALSE
FORM 1-FORM 2	4.00	17.67139	FALSE
FORM 1-FORM 3	15.75	17.67139	FALSE
FORM 1-FORM 4	12.25	17.67139	FALSE
FORM 1-HS	4.00	17.67139	FALSE
FORM 1-T	8.00	17.67139	FALSE
FORM 2-FORM 3	11.75	17.67139	FALSE
FORM 2-FORM 4	8.25	17.67139	FALSE
FORM 2-HS	8.00	17.67139	FALSE
FORM 2-T	12.00	17.67139	FALSE
FORM 3-FORM 4	3.50	17.67139	FALSE
FORM 3-HS	19.75	17.67139	TRUE
FORM 3-T	23.75	17.67139	TRUE
FORM 4-HS	16.25	17.67139	FALSE
FORM 4-T	20.25	17.67139	TRUE
HS-T	4.00	17.67139	FALSE

Donde: T0 (T), T1 (HS), T2 (DAF), T3 (FI), T4 (Form1), T5 (Form 2), T6 (Form 3), T7 (Form 4).

Anexo 16: Prueba de Kruskal-wallis para nitrógeno mineral acumulado al día 90 de la evaluación

```

                                kruskal-wallis rank sum test
data: Resultado_90d by Trat
Kruskal-wallis chi-squared = 26.372, df = 6, p-value = 0.0001898

Multiple comparison test after kruskal-wallis
p.value: 0.05
Comparisons

```

	obs.dif	critical.dif	difference
DAF-FORM 1	4.25	17.67139	FALSE
DAF-FORM 2	3.50	17.67139	FALSE
DAF-FORM 3	11.75	17.67139	FALSE
DAF-FORM 4	7.75	17.67139	FALSE
DAF-HS	8.25	17.67139	FALSE
DAF-T	12.25	17.67139	FALSE
FORM 1-FORM 2	7.75	17.67139	FALSE
FORM 1-FORM 3	16.00	17.67139	FALSE
FORM 1-FORM 4	12.00	17.67139	FALSE
FORM 1-HS	4.00	17.67139	FALSE
FORM 1-T	8.00	17.67139	FALSE
FORM 2-FORM 3	8.25	17.67139	FALSE
FORM 2-FORM 4	4.25	17.67139	FALSE
FORM 2-HS	11.75	17.67139	FALSE
FORM 2-T	15.75	17.67139	FALSE
FORM 3-FORM 4	4.00	17.67139	FALSE
FORM 3-HS	20.00	17.67139	TRUE
FORM 3-T	24.00	17.67139	TRUE
FORM 4-HS	16.00	17.67139	FALSE
FORM 4-T	20.00	17.67139	TRUE
HS-T	4.00	17.67139	FALSE

Donde: T0 (T), T1 (HS), T2 (DAF), T3 (FI), T4 (Form1), T5 (Form 2), T6 (Form 3), T7 (Form 4).

Anexo 17: Prueba de Kruskal-wallis para nitrato neto al día 90 de la evaluación

```
kruskal-wallis rank sum test
data: Resultado_90d by Trat
Kruskal-wallis chi-squared = 22.26, df = 5, p-value = 0.0004673

> kruskalmc (Resultado_90d ~ Trat)
Multiple comparison test after Kruskal-wallis
p.value: 0.05
Comparisons
```

	obs.dif	critical.dif	difference
DAF-FORM 1	8.00	14.676	FALSE
DAF-FORM 2	4.00	14.676	FALSE
DAF-FORM 3	7.75	14.676	FALSE
DAF-FORM 4	4.25	14.676	FALSE
DAF-HS	12.00	14.676	FALSE
FORM 1-FORM 2	4.00	14.676	FALSE
FORM 1-FORM 3	15.75	14.676	TRUE
FORM 1-FORM 4	12.25	14.676	FALSE
FORM 1-HS	4.00	14.676	FALSE
FORM 2-FORM 3	11.75	14.676	FALSE
FORM 2-FORM 4	8.25	14.676	FALSE
FORM 2-HS	8.00	14.676	FALSE
FORM 3-FORM 4	3.50	14.676	FALSE
FORM 3-HS	19.75	14.676	TRUE
FORM 4-HS	16.25	14.676	TRUE

Donde: T0 (T), T1 (HS), T2 (DAF), T3 (FI), T4 (Form1), T5 (Form 2), T6 (Form 3), T7 (Form 4).

Anexo 18: Prueba de Kruskal-wallis para nitrógeno mineral neto al día 90 de la evaluación

```

                                kruskal-wallis rank sum test
data: Resultado_90d by Trat
Kruskal-wallis chi-squared = 21.92, df = 5, p-value = 0.0005423

Multiple comparison test after kruskal-wallis
p.value: 0.05
Comparisons
      obs.dif critical.dif difference
DAF-FORM 1      13      14.676      FALSE
DAF-FORM 2       9      14.676      FALSE
DAF-FORM 3       1      14.676      FALSE
DAF-FORM 4       4      14.676      FALSE
DAF-HS          17      14.676       TRUE
FORM 1-FORM 2    4      14.676      FALSE
FORM 1-FORM 3   14      14.676      FALSE
FORM 1-FORM 4    9      14.676      FALSE
FORM 1-HS        4      14.676      FALSE
FORM 2-FORM 3   10      14.676      FALSE
FORM 2-FORM 4    5      14.676      FALSE
FORM 2-HS        8      14.676      FALSE
FORM 3-FORM 4    5      14.676      FALSE
FORM 3-HS       18      14.676       TRUE
FORM 4-HS       13      14.676      FALSE

```

Donde: T0 (T), T1 (HS), T2 (DAF), T3 (FI), T4 (Form1), T5 (Form 2), T6 (Form 3), T7 (Form 4).

Anexo 19: Prueba de Tukey para respiración neta al día 90 de la evaluación

```

          Df Sum Sq Mean Sq F value    Pr(>F)
Trat      5 146786   29357   10.41 8.11e-05 ***
Residuals 18  50747    2819
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' '

```

Simultaneous Tests for General Linear Hypotheses

Multiple Comparisons of Means: Tukey Contrasts

Fit: aov(formula = Resultado_90d ~ Trat)

Linear Hypotheses:

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)	
T2 - T1 == 0	132.0475	37.5453	3.517	0.02517	*
T4 - T1 == 0	173.1550	37.5453	4.612	0.00251	**
T5 - T1 == 0	146.6050	37.5453	3.905	0.01124	*
T6 - T1 == 0	174.1125	37.5453	4.637	0.00245	**
T7 - T1 == 0	262.9850	37.5453	7.004	< 0.001	***
T4 - T2 == 0	41.1075	37.5453	1.095	0.87710	
T5 - T2 == 0	14.5575	37.5453	0.388	0.99866	
T6 - T2 == 0	42.0650	37.5453	1.120	0.86666	
T7 - T2 == 0	130.9375	37.5453	3.487	0.02684	*
T5 - T4 == 0	-26.5500	37.5453	-0.707	0.97863	
T6 - T4 == 0	0.9575	37.5453	0.026	1.00000	
T7 - T4 == 0	89.8300	37.5453	2.393	0.21035	
T6 - T5 == 0	27.5075	37.5453	0.733	0.97509	
T7 - T5 == 0	116.3800	37.5453	3.100	0.05846	.
T7 - T6 == 0	88.8725	37.5453	2.367	0.21950	

```

---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
(Adjusted p values reported -- single-step method)

```

Donde: T0 (T), T1 (HS), T2 (DAF), T3 (FI), T4 (Form1), T5 (Form 2), T6 (Form 3), T7 (Form 4).

Anexo 20: Determinación de la eficiencia de uso de nitrógeno

a. Prueba de Tukey para la extracción de nitrógeno

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
Trat	7	1.2997	0.18567	16.77	7.84e-08	***
Residuals	24	0.2656	0.01107			

 Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Simultaneous Tests for General Linear Hypotheses
 Multiple Comparisons of Means: Tukey Contrasts

Fit: aov(formula = variable ~ Trat)

Linear Hypotheses:

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)	
T1 - T0 == 0	0.65200	0.07439	8.764	< 0.001	***
T2 - T0 == 0	0.32150	0.07439	4.322	0.00490	**
T3 - T0 == 0	0.38550	0.07439	5.182	< 0.001	***
T4 - T0 == 0	0.65825	0.07439	8.848	< 0.001	***
T5 - T0 == 0	0.58200	0.07439	7.824	< 0.001	***
T6 - T0 == 0	0.44325	0.07439	5.958	< 0.001	***
T7 - T0 == 0	0.38975	0.07439	5.239	< 0.001	***
T2 - T1 == 0	-0.33050	0.07439	-4.443	0.00364	**
T3 - T1 == 0	-0.26650	0.07439	-3.582	0.02787	*
T4 - T1 == 0	0.00625	0.07439	0.084	1.00000	
T5 - T1 == 0	-0.07000	0.07439	-0.941	0.97847	
T6 - T1 == 0	-0.20875	0.07439	-2.806	0.13991	
T7 - T1 == 0	-0.26225	0.07439	-3.525	0.03142	*
T3 - T2 == 0	0.06400	0.07439	0.860	0.98701	
T4 - T2 == 0	0.33675	0.07439	4.527	0.00304	**
T5 - T2 == 0	0.26050	0.07439	3.502	0.03307	*
T6 - T2 == 0	0.12175	0.07439	1.637	0.72487	
T7 - T2 == 0	0.06825	0.07439	0.917	0.98129	
T4 - T3 == 0	0.27275	0.07439	3.666	0.02292	*
T5 - T3 == 0	0.19650	0.07439	2.641	0.18961	
T6 - T3 == 0	0.05775	0.07439	0.776	0.99287	
T7 - T3 == 0	0.00425	0.07439	0.057	1.00000	
T5 - T4 == 0	-0.07625	0.07439	-1.025	0.96581	
T6 - T4 == 0	-0.21500	0.07439	-2.890	0.11924	
T7 - T4 == 0	-0.26850	0.07439	-3.609	0.02633	*
T6 - T5 == 0	-0.13875	0.07439	-1.865	0.58500	
T7 - T5 == 0	-0.19225	0.07439	-2.584	0.20986	
T7 - T6 == 0	-0.05350	0.07439	-0.719	0.99551	

 Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
 (Adjusted p values reported -- single-step method)

Donde: T0 (T), T1 (HS), T2 (DAF), T3 (FI), T4 (Form1), T5 (Form 2), T6 (Form 3), T7 (Form 4).

b. Prueba de Tukey para porcentaje de nitrógeno en follaje

```

Df Sum Sq Mean Sq F value Pr(>F)
Trat      7  2.1486  0.30694    9.317 1.48e-05 ***
Residuals 24  0.7907  0.03294
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Simultaneous Tests for General Linear Hypotheses
Multiple Comparisons of Means: Tukey Contrasts

Fit: aov(formula = variable ~ Trat)

Linear Hypotheses:
      Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
T1 - T0 == 0    0.9500    0.1283   7.402 < 0.001 ***
T2 - T0 == 0    0.5325    0.1283   4.149  0.00727 **
T3 - T0 == 0    0.4125    0.1283   3.214  0.06169 .
T4 - T0 == 0    0.6575    0.1283   5.123 < 0.001 ***
T5 - T0 == 0    0.6700    0.1283   5.220 < 0.001 ***
T6 - T0 == 0    0.4050    0.1283   3.156  0.06947 .
T7 - T0 == 0    0.3850    0.1283   3.000  0.09611 .
T2 - T1 == 0   -0.4175    0.1283  -3.253  0.05664 .
T3 - T1 == 0   -0.5375    0.1283  -4.188  0.00674 **
T4 - T1 == 0   -0.2925    0.1283  -2.279  0.34437
T5 - T1 == 0   -0.2800    0.1283  -2.182  0.39608
T6 - T1 == 0   -0.5450    0.1283  -4.246  0.00574 **
T7 - T1 == 0   -0.5650    0.1283  -4.402  0.00412 **
T3 - T2 == 0   -0.1200    0.1283  -0.935  0.97923
T4 - T2 == 0    0.1250    0.1283   0.974  0.97400
T5 - T2 == 0    0.1375    0.1283   1.071  0.95687
T6 - T2 == 0   -0.1275    0.1283  -0.993  0.97107
T7 - T2 == 0   -0.1475    0.1283  -1.149  0.93844
T4 - T3 == 0    0.2450    0.1283   1.909  0.55854
T5 - T3 == 0    0.2575    0.1283   2.006  0.49779
T6 - T3 == 0   -0.0075    0.1283  -0.058  1.00000
T7 - T3 == 0   -0.0275    0.1283  -0.214  1.00000
T5 - T4 == 0    0.0125    0.1283   0.097  1.00000
T6 - T4 == 0   -0.2525    0.1283  -1.967  0.52252
T7 - T4 == 0   -0.2725    0.1283  -2.123  0.42877
T6 - T5 == 0   -0.2650    0.1283  -2.065  0.46324
T7 - T5 == 0   -0.2850    0.1283  -2.221  0.37460
T7 - T6 == 0   -0.0200    0.1283  -0.156  1.00000
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
(Adjusted p values reported -- single-step method)

```

Donde: T0 (T), T1 (HS), T2 (DAF), T3 (FI), T4 (Form1), T5 (Form 2), T6 (Form 3), T7 (Form 4).

Anexo 21: Prueba de Tukey para altura de planta al día 90 de la evaluación

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)					
F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	786.26	7	112.32	0.52	0.8078
Tratamiento	786.27	7	112.32	0.52	0.8078
Error	5147.39	24	214.47		
Total	5933.66	31			

Tratamiento	Medias	n	E.E.
T6	130.38 a	4	7.32
T4	124.28 a	4	7.32
T3	122.15 a	4	7.32
T7	120.65 a	4	7.32
T0	120.18 a	4	7.32
T2	118.58 a	4	7.32
T1	118.45 a	4	7.32
T5	111.85 a	4	7.32

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)

Donde: T0 (T), T1 (HS), T2 (DAF), T3 (FI), T4 (Form1), T5 (Form 2), T6 (Form 3), T7 (Form 4).

Anexo 22: Prueba de Tukey para peso seco del follaje al día 90 de la evaluación

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)					
F.V.	SC	Gl	CM	F	p-valor
Modelo	1329.44	7	189.92	4.27	0.0034
Tratamiento	1329.44	7	189.92	4.27	0.0034
Error	1066.33	24	44.43		
Total	2395.78	31			

Tratamiento	Medias	n	E.E.
T4	80.5 a	4	3.33
T6	79.63 a	4	3.33
T7	75.85 ab	4	3.33
T5	74.12 ab	4	3.33
T3	73.78 ab	4	3.33
T1	66.16 ab	4	3.33
T0	63.61 b	4	3.33
T2	63.34 b	4	3.33

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)

Donde: T0 (T), T1 (HS), T2 (DAF), T3 (FI), T4 (Form1), T5 (Form 2), T6 (Form 3), T7 (Form 4).

Anexo 23: Prueba de Tukey para peso seco de raíz al día 90 de la evaluación

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)					
F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	305.35	7	43.62	11.62	<0.0001
Tratamiento	305.35	7	43.62	11.62	<0.0001
Error	90.13	24	3.76		
Total	395.48	31			

Tratamiento	Medias	n	E.E.
T3	20.46 a	4	0.97
T5	15.03 b	4	0.97
T7	13.64 bc	4	0.97
T0	13.58 bc	4	0.97
T4	13.23 bc	4	0.97
T6	12.23 bc	4	0.97
T1	10.22 c	4	0.97
T2	9.88 c	4	0.97

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)

Donde: T0 (T), T1 (HS), T2 (DAF), T3 (FI), T4 (Form1), T5 (Form 2), T6 (Form 3), T7 (Form 4).

Anexo 24: Preparación de reactivos para la prueba de nitrato (NO_3^-)

Para preparar la solución de NaOH 4N se pesó 160 g de NaOH y colocó dentro de una fiola volumétrica de 1 L con 500 mL de agua desionizada/destilada y poco a poco con agitación ligera se enrasaba y mezclaba completamente.

Para preparar la solución de K_2SO_4 0.34M se pesó 118.5 g de K_2SO_4 y se colocó dentro de una fiola volumétrica de 2 L con 500 mL de agua desionizada y poco a poco con agitación ligera se enrasaba y mezclaba completamente.

Para preparar la solución de ácido salicílico se pesó 5 g de ácido salicílico y colocó en una fiola volumétrica de 250 mL, luego se adicionó 95 mL de ácido sulfúrico. Se agitó por 30 minutos envuelto con papel aluminio para protegerlo de la luz; al final se dejó reposar de un día para otro en un ambiente oscuro.

Para preparar la solución stock de N- NO_3 (1000 ppm), se pesó 6.070 g de NaNO_3 y colocó en una fiola de 1 L, al final se enrasó con agua destilada. Se transfería 10 mL de la solución stock de N- NO_3 a una fiola de 100 mL y enrasaba con agua destilada, de ahí se tomó alícuotas de 0, 2, 4, 6, 8 y 10 ml de la solución y con una micropipeta y se adicionó a las fiolas de 100 mL, finalmente enrasando con agua destilada.

Anexo 25: Preparación de reactivos para la prueba de amonio (NH_4^+)

Para preparar la solución extractante KCl 1N, se pesó 74.5 g de KCl y se disolvió en 1 L de agua destilada.

Para preparar la solución de NaOH, se disolvió 27 g de NaOH, 3 g de EDTA-sódico y 5 g de acetato de sodio en 1 L de agua destilada y se almacenó en frasco de polietileno.

Para preparar la solución de fenol básico, se preparó en el día de uso y se adicionaba 12 mL de fenol líquido de 90% a 250 mL de la solución de NaOH preparada anteriormente.

Para preparar la solución de hipoclorito de sodio, se mezcló una parte de NaClO al 5.25% (clorox®) con cuatro partes de agua destilada.

Para preparar la solución stock de N- NH_4 (1000 ppm), se pesó 3.819 g de NH_4Cl y se colocó en fiola de 1 L, enrazó al final con agua destilada.

Para preparar la solución stock de N- NH_4 (1000 ppm). Se transfería 10 mL de la solución stock de N- NO_3 a una fiola de 100 mL y enrasaba con agua destilada, de ahí se tomó alícuotas de 0, 5, 10, 15, 20, 25 y 30 ml de la solución y con una micropipeta y se adicionó a las fiolas de 100 mL, finalmente enrazando con agua.