



UNIVERSIDAD DE LOS ANDES
FACULTAD DE CIENCIAS
DEPARTAMENTO DE BIOLOGÍA
INSTITUTO DE CIENCIAS AMBIENTALES Y ECOLOGICAS



**Efecto del suministro de Gallinazo sobre el proceso de
nitrificación en suelos agrícolas de los
Páramos de Mérida**

**Trabajo Especial de Grado para Optar al Título
de Licenciada en Biología**

JHAYDYN AILICEC TORO LÓPEZ

Tutor: Dr. Daniel Machado D.

Cotutora: Dra. Lina Sarmiento M.

Jurado:

Dr. Dimas Acevedo Novoa

Prof(a). María E. Marquina

**Mérida – Venezuela
Junio 2008**

INFORME DEL JURADO NOMBRADO POR EL CONSEJO DE LA FACULTAD DE CIENCIAS DE LA UNIVERSIDAD DE LOS ANDES PARA CONSIDERAR EL TRABAJO ESPECIAL DE GRADO DE LA BACHILLER

JHAYDYN AILICEC TORO LÓPEZ

En Mérida a los 12 días del mes Junio de 2008, a las 3:00 p.m. se reunieron los Profesores: Daniel Machado Díaz, Dimas Acevedo Novoa y María Eugenia Marquina de la Facultad de Ciencias, miembros del jurado nombrado por el Consejo de la Facultad de Ciencias, para revisar el Trabajo Especial de Grado que sobre el tema: **“Efecto del Suministro de Gallinazo Sobre el Proceso de Nitrificación en Suelos Agrícolas de los Páramos de Mérida”**, presentado por la Bachiller **JHAYDYN AILICEC TORO LÓPEZ**. Titular de la Cédula de Identidad N° V-14.699.242, para optar al título de:

LICENCIADA EN BIOLOGÍA

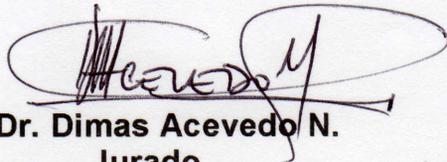
en la Facultad de Ciencias de la Universidad de Los Andes. Acto seguido se procedió a oír la exposición que sobre el tema arriba mencionado realizó la Bachiller **JHAYDYN AILICEC TORO LÓPEZ**.

Después del correspondiente interrogatorio, el Jurado procedió a deliberar sobre la calificación del trabajo sometido a su consideración.

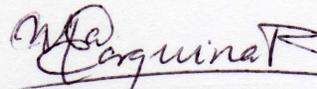
Finalmente el Jurado lo declaró aprobado con la calificación de veinte (20) puntos y recomendado para su publicación.



Prof. Daniel Machado D.
Tutor



Dr. Dimas Acevedo N.
Jurado



Prof. María E. Marquina
Jurado



Prof. Lina Sarmiento
Co-tutora



Este trabajo recibió financiamiento de la Universidad de Los Andes, a través del Consejo de Desarrollo Científico, Humanístico y Tecnológico (CDCHT), Proyecto: C-1503-07-01-F.

Agradecimientos

A mi Tutor Daniel Machado, por su abnegada labor, dedicación y aportes invaluables en la elaboración de esta tesis, por sus conocimientos y enseñanzas impartidas con vocación de trabajo y profesionalismo y por su ejemplo de excelencia y entrega en la investigación.

A mi Cotutora Lina Sarmiento, por ser pieza fundamental y por sus aportes invaluables en la realización de esta tesis, por brindarme la oportunidad de trabajo y enriquecimiento en el área de la ecología a lo largo de la carrera, por su ejemplo de excelencia y entrega en la investigación y por sus importantes recomendaciones y sobre todo por su amistad.

A los miembros del Jurado: Dimas Acevedo y María Eugenia Marquina por sus importantes observaciones, correcciones, comentarios y aportes para el mejoramiento de la tesis.

A Julia K. Smith, por los conocimientos y enseñanzas impartidas en el manejo de programas de SIG, por su colaboración en el diseño del mapa del área de estudio de este trabajo y por sus importantes consejos y amistad.

Al Instituto de Ciencias Ambientales y Ecológicas (ICAE), Departamento de Biología, Facultad de Ciencias, Universidad de Los Andes, por sus recursos humanos y laboratorio.

A Ana Felicien por su importante apoyo y colaboración en el aporte de los suelos y tablas de propiedades utilizadas en este trabajo y “discusiones ecológicas”.

A Francis, Darcy, por su apoyo y colaboración en el trabajo técnico del laboratorio.

A Zulay Méndez por su asistencia técnica, enseñanzas y apoyo en el laboratorio y por su amistad.

A todos los amigos y técnicos de laboratorio que brindaron su apoyo en la preparación y montaje de la incubación: Dayan, Adriana, Luis, Ana, Eloy, Yolanda, Glenda, Dayana, Darcy, Francis, Zulay y en especial a mi Madre “Haydeé” por su apoyo ¡hasta en el laboratorio!

A mis amigos y compañeros de opción en Ecología Vegetal, Eloy Torres y Yolanda Cáceres por su importante apoyo como grupo de estudio y por su valiosa amistad.

A mis amigos y compañeros de estudio del básico de Biología, Mildre, Adriana, Josmar, Yani, Carla, Nelson, Graciela, Eloy, Maurí y Glenda, por su importante apoyo como grupo de estudio y por su valiosa amistad.

A Nancy, Idalba y Sioly por su trabajo y apoyo administrativo.

A mis profesores de Ecología: Lina Sarmiento, Licia Romero, Dimas Acevedo, Michele Ataroff, Eulogio Chacón, Fermin Rada, Carlos Gracia, Anairamis Aranguren y Teresa Schwarzkopf, por el conocimiento y enseñanzas impartidas.

A Anairamis Aranguren, por su asesoría en el pregrado y valiosa amistad.

A Licia Romero, por su asesoría en las ponencias de los trabajos del Encuentro de las Ciencias.

A mis amigos Valina, Dayan, Ricardo y Gerardo López “el tío más pana”...porque siempre puedo contar con ustedes.

Y especialmente a las perlas más preciosas de mi corazón

Mis Padres, Haydeé y Julio, que cubren con infinito amor mi corazón y me instruyen en el camino de la verdad, y con gran esfuerzo me han apoyado incondicionalmente para alcanzar este título. A mi Hermano Julio, por su apoyo y estímulo en seguir adelante y por compartir juntos las alturas. A mi sobrina Salmái, por ser la alegría de mi corazón. Y al resto de la Familia López y Toro por su estímulo y apoyo incondicional.

Dedicatoria

*“Al Creador de todas la cosas, por
infundir en mi aliento de vida y por
revelarle a los hombres el susurro de su
grandeza y el misterio de las cosas”*

Resumen

La nitrificación consiste en la oxidación biológica del amonio a nitrato efectuada por microorganismos quimioautótrofos, que utilizan el NH_4^+ como fuente de energía y CO_2 como sustrato para incorporarlo a su biomasa. En los Páramos Andinos, los agricultores emplean grandes cantidades de fertilizantes minerales amoniacales, combinados con estiércol de aves de corral (gallinazo). En este trabajo se plantean dos hipótesis: 1) que el CO_2 proveniente de la descomposición del gallinazo podría favorecer la nitrificación, al servir como fuente de carbono a los microorganismos nitrificantes y 2) que la nitrificación y la respuesta al gallinazo deberían ser distintas en suelos con características diferentes. El objetivo de este estudio fue evaluar el efecto del suministro del gallinazo sobre el proceso de nitrificación en tres suelos agrícolas de los Páramos de Mérida, contrastantes en sus propiedades físico-químicas e historias de manejo: suelo de páramo manejado con una agricultura con descansos largos, (SP); suelo degradado, que fue abandonado después de muchas décadas de cultivo de trigo (SD) y suelo agrícola con manejo intensivo durante los últimos 20 años (SA). Para ello se realizaron incubaciones de suelos, durante 24 días, en condiciones controladas de laboratorio, con suministro de N-NH_4^+ , y con y sin suministro de gallinazo. En cada suelo se midieron los contenidos de N-NH_4^+ y N-NO_3^- y las cantidades de CO_2 liberadas en distintos tiempos de incubación: 3, 7, 10, 14, 18, 21 y 24 días. Se calcularon los % de nitrificación, los cuales resultaron marcada y significativamente diferentes en los suelos estudiados, siendo el orden $\text{SA} > \text{SD} > \text{SP}$. Se sugiere que el pH y el contenido de Ca, Mg y K son los factores que posiblemente determinan estas diferencias entre los suelos. Por otra parte se observó que en los tres suelos el suministro de gallinazo estimuló la respiración y la nitrificación, siendo mayor el efecto en el suelo SD. Se concluye que el suministro de gallinazo: 1) estimula la nitrificación porque promueve la liberación de CO_2 por parte de la microbiota heterótrofa del suelo y 2) modifica la dinámica de respiración y nitrificación de manera distinta en los tres suelos estudiados de los Páramos de Mérida.

Palabras Claves: nitrificación, respiración-edáfica, gallinazo, suelos agrícolas, Páramos de Mérida.

Índice de Contenido

1. Introducción.....	1
1.1 Marco Teórico.....	1
1.1.1 El nitrógeno como elemento vital.....	1
1.1.2 El nitrógeno en los ecosistemas.....	1
1.1.3 Ciclo del nitrógeno y los principales procesos involucrados.....	1
1.1.4 Nitrificación.....	4
1.1.4.1 Definición.....	4
1.1.4.2 Importancia.....	5
1.1.4.3 Factores que influyen en el proceso de nitrificación.....	6
1.1.4.3.1 Concentración de NH_4^+	7
1.1.4.3.2 Concentración de CO_2	7
1.1.4.3.3 pH.....	8
1.1.4.3.4 Aireación.....	8
1.1.4.3.5 Humedad.....	8
1.1.4.3.6 Temperatura.....	9
1.1.4.3.7 Materia Orgánica del suelo (MOS).....	9
1.1.4.3.8 Textura del suelo.....	10
1.2 Antecedentes.....	11
1.2.1 Historias de los sistemas de producción agrícola en los Andes venezolanos....	11
1.2.2 El uso actual de la tierra.....	12
1.2.3 Fertilizantes minerales y enmiendas orgánicas.....	13
1.3 Justificación del estudio de la nitrificación.....	14
2. Hipótesis.....	16
3. Objetivos.....	16
3.1 Objetivo general.....	16
3.2 Objetivos específicos.....	16
4. Aplicabilidad de los resultados.....	17
5. Metodología.....	17

5.1	Área de estudio.....	18
5.2	Caracterización de los suelos.....	20
5.2.1	Suelo de páramo manejado con descanso largo.....	21
5.2.2	Suelo degradado.....	22
5.2.3	Suelo agrícola con manejo intensivo.....	22
5.3	Caracterización del substrato gallinazo.....	23
5.4	Diseño experimental.....	24
5.5	Incubaciones.....	25
5.6	Mediciones.....	29
5.6.1	Contenido de $N-NH_4^+$ y de $N-NO_3^-$	29
5.6.2	CO_2 liberado.....	30
5.6.3	pH de los suelos y del gallinazo.....	31
5.7	Equipos y materiales.....	34
5.8	Procesamiento de datos.....	35
5.8.1	Nitrificación.....	35
5.8.2	Respiración edáfica.....	35
5.8.3	Mineralización del substrato gallinazo.....	36
5.9	Análisis de resultados.....	37
5.9.1	Efecto del gallinazo y del tipo de suelo sobre la nitrificación y la respiración.....	37
5.9.2	Relación entre nitrificación y respiración edáfica.....	37
5.9.2.1	Efecto de las trampas de NaOH sobre la nitrificación.....	37
5.9.2.2	Relación entre el % de nitrificación y la cantidad de C- CO_2 respirada.....	38
6.	Resultados y análisis de los resultados.....	39
6.1	Resultados de la Nitrificación.....	39
6.1.1	Suelo de Páramo.....	39
6.1.2	Suelo Degradado.....	40
6.1.3	Suelo Agrícola.....	43
6.2	Análisis estadístico de los resultados de la nitrificación.....	45
6.2.1	ANOVA con dos factores: tipo de suelo y gallinazo.....	45
6.2.2	ANOVA con dos factores: gallinazo y tiempo.....	47
6.3	Resultados de la Respiración.....	48

6.3.1 Suelo de Páramo.....	48
6.3.2 Suelo Degradado.....	49
6.3.3 Suelo Agrícola.....	51
6.3.4 Mineralización del C del sustrato gallinazo.....	51
6.4 Análisis estadístico de los resultados de la respiración edáfica.....	54
6.4.1 ANOVA con dos factores: tipo de suelo y gallinazo, para la respiración:.....	54
6.4.1.1 Respiración por periodos de tiempo.....	54
6.4.1.2 Respiración acumulación en el tiempo.....	55
6.4.2 ANOVA de un factor: gallinazo, para la respiración.....	57
6.4.2.1 Respiración por periodos de tiempo.....	57
6.4.2.2 Respiración acumulación en el tiempo.....	58
6.5 Análisis de los resultados de pH.....	58
6.6 Relación entre nitrificación y respiración.....	60
6.6.1 Efecto de las trampas de NaOH sobre la nitrificación.....	60
6.6.2 Relación entre los % de nitrificación y las cantidades de C-CO ₂ respiradas.....	62
6.7 Resumen del análisis de resultados.....	66
7. Discusión.....	68
7.1 Comprobación de las hipótesis.....	68
7.1.1 Hipótesis I.....	68
7.1.2 Hipótesis II.....	72
8. Conclusiones.....	77
9. Implicaciones de los resultados obtenidos para el manejo de los suelos.....	77
10. Perspectivas de investigación en el problema bajo estudio.....	79
11. Referencias bibliográficas.....	81
12. Anexos.....	86

Índice de Figuras

1. Figura 1. Diagrama de los principales flujos y compartimientos del nitrógeno en un agroecosistema. Basado en Paul y Clark (1989); Sutton (1998); Aparicio et. al, (2000); Smith y Smith (2002); Machado (2005).....2
2. Figura 2. Dinámica de la liberación de C durante la descomposición de dos substratos contrastantes, gallinazo (G) y cascara de arroz (P), expresada como un coeficiente acumulado de mineralización (mg de C-CO₂ liberado acumulado por cada 100 mg de C_{substrato}), tomado de Machado (2005).....15
3. Figura 3. Ubicación del área de muestreo de los suelos en estudio: Gavidia (SP), La Angostura-Misintá (SD), y Misteque (SA); representativos de los sistemas de manejo agrícolas de los Andes venezolanos, Cuenca alta del Río Chama, Municipio Rangel, Estado Mérida, Venezuela.....19
4. Figura 4. Esquema metodológico general del Trabajo Especial de Grado: Efecto del suministro de Gallinazo sobre el proceso de nitrificación, en suelos agrícolas de los Andes venezolanos. * El día 24 se realizaron extracciones con K₂SO₄ de 4 frascos con gallinazo y 4 sin gallinazo de los que habían tenido trampa de NaOH para la determinación del CO₂ respirado, a los cuales se les determinó el contenido de NH₄⁺ y NO₃⁻.....28
5. Figura 5. Esquema metodológico para la determinación de N mineral (Contenido de N-NH₄⁺ y N-NO₃⁻), Modificado a partir de Abreu (2004); Felicien (2005). * En el último muestreo (24 días) se tomaron de 4 frascos con gallinazo y 4 sin gallinazo de los que habían tenido trampa de NaOH para la determinación del CO₂ respirado, a los cuales se les determinó el contenido de NH₄⁺ y NO₃⁻.....32
6. Figura 6. Esquema metodológico para la determinación del CO₂ liberado (Respiración edáfica).....33
7. Figura 7. Curso con el tiempo (días) de incubación, de las cantidades de N en el suelo de páramo (mg Kg⁻¹) sin gallinazo (-G) y con gallinazo (+G). A. En forma de amonio (N-NH₄⁺). B. En forma de nitrato + nitrito (N-NO₃⁻). C. Mineral y D. Porcentaje de N nitrificado (Nitrificación %). N₀ son las cantidades de N iniciales correspondientes. T-G y T+G son los valores determinados en suelos sin gallinazo (-G) y con gallinazo (+G)

- ambos con trampas de NaOH para la determinación del CO₂ respirado. Las barras representan los valores de la desviación normal ($n = 4$).....41
8. Figura 8. Curso con el tiempo (días) de incubación, de las cantidades de N en el suelo **degradado** (mg Kg⁻¹) sin gallinazo (-G) y con gallinazo (+G). A. En forma de amonio (N-NH₄⁺). B. En forma de nitrato + nitrito (N-NO₃⁻). C. Mineral y D. Porcentaje de N nitrificado (Nitrificación %). N₀ son las cantidades de N iniciales correspondientes. T-G y T+G son los valores determinados en suelos sin gallinazo (-G) y con gallinazo (+G) ambos con trampas de NaOH para la determinación del CO₂ respirado. Las barras representan los valores de la desviación normal ($n = 4$).....42
9. Figura 9. Curso con el tiempo (días) de incubación, de las cantidades de N en el suelo **agrícola** (mg Kg⁻¹) sin gallinazo (-G) y con gallinazo (+G). A. En forma de amonio (N-NH₄⁺). B. En forma de nitrato + nitrito (N-NO₃⁻). C. Mineral y D. Porcentaje de N nitrificado (Nitrificación %). N₀ son las cantidades de N iniciales correspondientes. T-G y T+G son los valores determinados en suelos sin gallinazo (-G) y con gallinazo (+G) ambos con trampas de NaOH para la determinación del CO₂ respirado. Las barras representan los valores de la desviación normal ($n = 4$).....44
10. Figura 10. A. Cantidad de C-CO₂ liberado por respiración edáfica del suelo de **páramo** (mg Kg⁻¹) sin gallinazo (-G) y con gallinazo (+G) durante los periodos de tiempo transcurrido entre los días de la incubación: 0 a 3, 3 a 7, 7 a 10, 10 a 14, 14 a 18, 18 a 21, y 21 a 24 días. B. Curso de la cantidad acumulada de C-CO₂ (mg Kg⁻¹) liberada del suelo de páramo sin gallinazo (-G) y con gallinazo (+G) durante la incubación. Las barras representan los valores de la desviación normal ($n = 8$).....50
11. Figura 11. A. Cantidad de C-CO₂ liberado por respiración edáfica del suelo **degradado** (mg Kg⁻¹) sin gallinazo (-G) y con gallinazo (+G) durante los periodos de tiempo transcurrido entre los días de la incubación: 0 a 3, 3 a 7, 7 a 10, 10 a 14, 14 a 18, 18 a 21, y 21 a 24 días. B. Curso de la cantidad acumulada de C-CO₂ (mg Kg⁻¹) liberada del suelo de páramo sin gallinazo (-G) y con gallinazo (+G) durante la incubación. Las barras representan los valores de la desviación normal ($n = 8$).....52
12. Figura 12. A. Cantidad de C-CO₂ liberado por respiración edáfica del suelo **agrícola** (mg Kg⁻¹) sin gallinazo (-G) y con gallinazo (+G) durante los periodos de tiempo transcurrido entre los días de la incubación: 0 a 3, 3 a 7, 7 a 10, 10 a 14, 14 a 18, 18 a 21, y 21 a 24 días. B. Curso de la cantidad acumulada de C-CO₂ (mg Kg⁻¹) liberada del suelo de páramo sin gallinazo (-G) y con gallinazo (+G) durante la incubación. Las barras representan los valores de la desviación normal ($n = 8$).....53

13. Figura 13. Curso de la cantidad acumulada de C-CO₂ (mg Kg⁻¹) mineralizada del substrato gallinazo durante la incubación, para los distintos tipos de suelo. SP: Suelo Páramo. SD: Suelo Degradado. SA: Suelo Agrícola. Las barras de error representan la desviación normal (n = 8).....54
14. Figura 14. Correlación entre el % de nitrificación y la cantidad de C-CO₂ respirado acumulado para todo el conjunto de valores de los distintos suelos con y sin suministro de gallinazo, con su respectiva regresión lineal y valor de R².....64
15. Figura 15. Δ% Nitrificación en relación al Δ mg C-CO₂ en todos los tiempos de incubación para todos los suelos: SP: Suelo de Páramo, SD: Suelo Degradado, SA: Suelo Agrícola.....64
16. Figura 16. Regresión exponencial entre el Δ% Nitrificación en relación al Δ mg C-CO₂ en todos los tiempo de incubación con su respectivo valor de R². A. Suelo de Páramo. B. Suelo Degradado. C. Suelo Agrícola. Los puntos ▲ no fueron considerados para el ajuste de la función exponencial, en el caso del suelo de páramo debido al Δ % de nitrificación ≤ 0 y en el caso del suelo agrícola debido a que los % nitrificación para esos puntos resultaron > 94%.....65
17. Figura 17. Regresión exponencial entre el Δ% Nitrificación en relación al Δ mg C-CO₂ en todos los tiempos de incubación con su respectivo valor de R², para los suelos de páramo (SP) y degradado (SD).....66

Índice de Tablas

1. Tabla 1. Principales características fisicoquímicas de los suelos agrícolas (0-15 cm de profundidad) estudiados en este trabajo. SP: Suelo de páramo con descanso largo (Gavidia), SD: Suelo degradado (Angostura-Misintá), SA: Suelo agrícola con manejo intensivo (Misteque). A: arcillas, l: limo, a: arena, C/N: relación carbono nitrógeno, N total: nitrógeno total, C.O: carbono orgánico, CC: capacidad de campo, PMP: punto de marchitamiento permanente, Bases Intercambiables: Ca, Mg, Na y K; Σ Bases: sumatoria de bases, % SB: porcentaje de saturación de bases, CIC: capacidad de intercambio catiónico. Análisis realizados en el Laboratorio de Suelos del Instituto de Geografía y Conservación de los Recursos Naturales Renovables, Facultad de Ciencias Forestales y Ambientales, ULA. Los valores entre paréntesis corresponden al error estándar. Letras distintas indican diferencias significativas entre las medias de los suelos ($n = 3$; $P < 0,05$; Prueba de Tukey o Prueba de Dunnett), NS: no significativo. Tomado de Felicien (2008).....20
2. Tabla 2. Características químicas principales del substrato gallinazo: C.O.: carbono orgánico, N total: nitrógeno total, C/N: relación carbono nitrógeno, N-NH⁺₄: contenido de N en forma de amonio, N-NO⁻₃: contenido de N en forma nitrato y nitrito y pH (1:5 substrato en agua). Los valores entre paréntesis corresponden a la desviación normal ($n = 3$). **A**: Análisis realizado en el Laboratorio de Suelos del Instituto de Geografía y Conservación de los Recursos Naturales Renovables, Facultad de Ciencias Forestales y Ambientales, ULA. **B**: Análisis realizado en el Laboratorio de Análisis Químico del Instituto de Ciencias Ambientales y Ecológicas (ICAE), Facultad de Ciencias, ULA. Tomado de Felicien (2008). **E**: Análisis determinado en este trabajo, realizado en el Laboratorio de Análisis Químico del Instituto de Ciencias Ambientales y Ecológicas (ICAE), Facultad de Ciencias, ULA.....24
3. Tabla 3. Cantidad de: la fuente (NH)₄SO₄ y gallinazo, aplicada (g/50g ss); la fuente de N aplicada equivalente en campo (Mg ha⁻¹); N-NH⁺₄ aportada por la fuente (mg N-NH⁺₄/50g ss); N-NH⁺₄ total aplicado (mg N-NH⁺₄/50g ss); N-NH⁺₄ total (mg N-NH⁺₄/Kg⁻¹ ss) y N-NH⁺₄ total aplicada equivalente en campo (Kg N-NH⁺₄ ha⁻¹). Las cantidades aplicadas equivalentes en campo fueron calculadas considerando que las fuentes de N-NH⁺₄ ((NH)₄SO₄ y gallinazo) se distribuyen en una capa de suelo de 0 a 10 cm de profundidad con una densidad aparente de 1,26g cm⁻³25

4. Tabla 4. Resultados del análisis de varianza de dos factores, tipo de suelos y gallinazo, para el porcentaje de nitrificación a distintos tiempo de incubación para todos los suelos en estudio.....45
5. Tabla 5. Valores promedios de la nitrificación (%) sin y con suministro de gallinazo (-G y +G) para cada uno de los suelos, SP: Suelo de Páramo, SD: Suelo Degradado y SA: Suelo Agrícola, en los distintos tiempos de incubación. Los valores entre paréntesis corresponden a la desviación normal. Letras distintas indican diferencias significativas entre las medias de los % de nitrificación de los distintos tipos de suelos sin gallinazo y con gallinazo por separado ($n = 4$, Tukey B, $P < 0,01$).....46
6. Tabla 6. Resultados de los análisis de varianza con dos factores, tratamiento y tiempo, para el % de nitrificación en cada tipo de suelo por separado. SP: Suelo de Páramo. SD: Suelo Degradado. SA: Suelo Agrícola.....48
7. Tabla 7. Resultados del análisis de varianza de dos factores, tipo de suelo y gallinazo, para las cantidades de C-CO₂ respirados en los periodos de tiempo evaluados durante la incubación.....55
8. Tabla 8. Resultados del análisis de varianza de dos factores, tipo de suelo y gallinazo, para las cantidades de C-CO₂ respiradas acumuladas a distintos tiempo de incubación.56
9. Tabla 9. Resultados del análisis de varianza de un factor, gallinazo, para la cantidad de C-CO₂ respirada en cada uno de los periodos de tiempo evaluados durante la incubación para cada uno de los tipos de suelo por separado. SP: Suelo de Páramo. SD: Suelo Degradado. SA: Suelo Agrícola.....57
10. Tabla 10. Resultados del análisis de varianza de un factor, gallinazo, para las cantidades de C-CO₂ respiradas acumuladas en cada uno de los tiempo de incubación evaluados para cada uno de los tipos de suelo por separado. SP: Suelo de Páramo. SD: Suelo Degradado. SA: Suelo Agrícola.....58
11. Tabla 11. Medias de los pH (1:5 suelo en agua) de los suelos estudiados, sin y con suministro de gallinazo. Los valores entre paréntesis corresponden a la desviación normal. Letras distintas indican diferencias significativas entre las medias de los pH de los distintos tipos de suelos sin y con gallinazo por separado ($n = 3$, Tukey B, $P < 0,01$). Análisis de varianza del factor gallinazo sobre el pH de los suelos, SP: Suelo de Páramo, SD: Suelo Degradado y SA: Suelo Agrícola, por separado.....59

12. Tabla 12. Análisis de varianza de dos factores, gallinazo y tipo de suelo, sobre el pH de los suelos estudiados.....60
13. Tabla 13. Valores promedio de la nitrificación (%) con y sin suministro de gallinazo (+G y -G), con y sin trampa de NaOH (+T y -T) a los 24 días de incubación y resultados de los análisis de varianza de dos factores (gallinazo y trampa de NaOH) para los % nitrificación en los distintos suelos por separado. SP: Suelo de Páramo. SD: Suelo Degradado. SA: Suelo Agrícola. Los valores entre paréntesis corresponden a la desviación normal. Letras distintas indican diferencias significativas entre las medias de los tratamientos con y sin trampa, con y sin gallinazo en cada tipo de suelo ($n = 4$, Tukey B, $P < 0,01$).....62

1. Introducción

1.1 Marco Teórico

1.1.1 El nitrógeno como elemento vital

El nitrógeno es un elemento indispensable para la existencia de la vida. Como se sabe, es un componente esencial de las proteínas, y por lo tanto tiene carácter vital en la química de todos los organismos (Sarmiento, 1984; Sutton, 1998). La atmósfera terrestre es el principal reservorio de N_2 . Sin embargo, la mayoría de los organismos no pueden utilizar el nitrógeno en su forma gaseosa, primero éste debe convertirse en compuestos de nitrato o amonio, que emplean las plantas para elaborar las proteínas, y consecutivamente los animales obtienen el nitrógeno mediante el consumo de los tejidos vegetales que previamente lo han absorbido (Sutton, 1998).

1.1.2 El nitrógeno en los ecosistemas

En los ecosistemas naturales y agroecosistemas el N es uno de los nutrientes que más limita la producción de biomasa vegetal (Woomer y Swift, 1994; Bowen y Baethgen, 1998). A pesar de que este elemento abunda en la atmósfera terrestre, con una concentración de 79% (Sarmiento, 1984; Sutton, 1998; Smith y Smith, 2002), en cambio en el suelo, escasamente se encuentra menos que el 1%. De esta cantidad sólo una parte se encuentra en forma disponible para las plantas como N mineral: amonio ($N-NH_4^+$) y nitratos ($N-NO_3^-$). Mientras que otra parte se encuentra en formas orgánicas que son sólo potencialmente disponibles a través del proceso de mineralización, llevado a cabo por microorganismos heterótrofos del suelo que utilizan la materia orgánica como substrato (Paul y Clark, 1989).

1.1.3 Ciclo de nitrógeno y los principales procesos involucrados

En el suelo el contenido de N disponible o potencialmente disponible, depende de un amplio y complejo ciclo, denominado “Ciclo del Nitrógeno”, en el que destacan un conjunto de procesos de transferencia entre los diferentes compartimientos del sistema:

atmósfera, suelo, agua y organismos, que determinan la cantidad y el tipo de compuesto en que se encuentra el elemento (Paul y Clark, 1989; Machado, 2005).

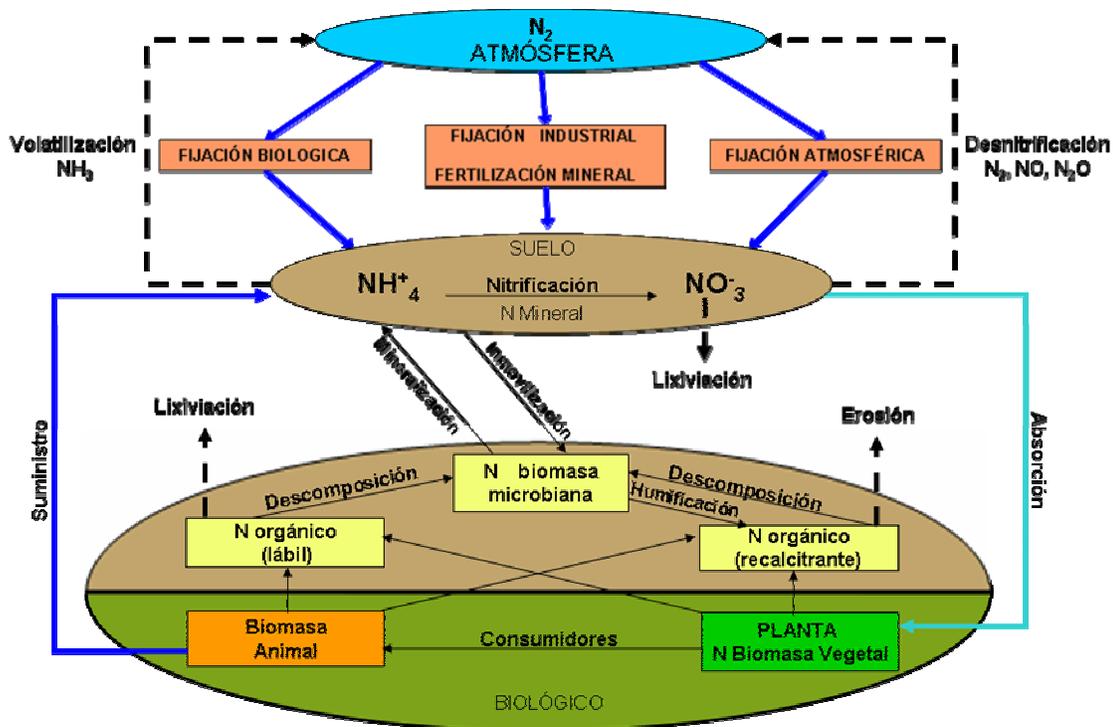


Figura 1. Diagrama de los principales flujos y compartimientos del nitrógeno en un agroecosistema. Basado en Paul y Clark (1989); Sutton (1998); Aparicio et al. (2000); Smith y Smith (2002); Machado (2005).

En la figura 1, se pueden observar los principales procesos involucrados en el ciclo del nitrógeno, los cuales son:

Fijación de nitrógeno. Se convierte el N atmosférico en compuestos de amonio y nitratos; a) mediante procesos bioquímicos a través de las bacterias fijadoras de nitrógeno que viven libres en el suelo, o bien asociadas en nódulos en las raíces de las leguminosas (fijación biológica); b) mediante procesos industriales llevados a cabo por la intervención de la especie humana en la fabricación de fertilizantes (fijación industrial); c) por acción química de alta energía, los relámpagos convierten el N atmosférico en amoníaco y ácido nítrico que precipita en la superficie de la tierra (fijación atmosférica).

Mineralización o amonificación. Se define como la degradación de proteínas, aminoácidos, ácidos nucleicos y otros compuestos de la materia orgánica, llevado a cabo por la microbiota del suelo, hasta liberar NH_4^+ , es decir, la microbiota liberará N en su forma mineral a partir del nitrógeno en forma orgánica del sustrato. La mineralización del N en forma de NH_4^+ va acompañada de la mineralización del C orgánico en forma de CO_2 . Este último proceso es conocido con el nombre de respiración edáfica.

Humificación. Proceso de descomposición de los residuos orgánicos vegetales y animales, donde el N orgánico, es incorporado al humus en forma de compuestos estables de alto peso molecular.

Inmovilización. Se refiere a la incorporación del NH_4^+ y NO_3^- en la biomasa microbiana para constituir sus aminoácidos, es decir, la microbiota tomará N mineral de la solución del suelo para incorporarlo a su estructura celular.

Nitrificación. Proceso por el cual el amonio se transforma en nitritos y nitratos, mediante las bacterias nitrificantes. En la próxima sección se expondrá con más detalle este proceso.

Desnitrificación. Consiste en la conversión de los NO_3^- en óxido nitroso (NO), óxido hiponitroso (N_2O) y N_2 , mediante la acción de las bacterias desnitrificantes. Estos gases salen del sistema.

Absorción. El N mineral disponible en el suelo es absorbido por las plantas.

Suministro. Entrada de N en forma de residuos orgánicos.

Lixiviación. Es la pérdida del N por drenaje.

Volatilización. Conversión de NH_4^+ en amoníaco (NH_3) gaseoso que se pierde del sistema.

Erosión. Desgaste de la superficie del suelo por agentes externos de naturaleza física, química o antrópica.

1.1.4 Nitrificación

1.1.4.1 Definición

La nitrificación se define como la oxidación biológica del NH_4^+ a NO_3^- , efectuada por microorganismos quimioautótrofos, que utilizan el N- NH_4^+ como fuente de energía (Grant, 1994). Tal como se expresa en la reacción química (Hattori, 1973; Sarmiento, 1984; Paul y Clark; 1989, Smith y Smith, 2002):



De acuerdo al grupo de bacterias nitrificantes que actúan durante el proceso de nitrificación, éste se divide en dos etapas:

En la primera etapa, las bacterias del género *Nitrosomonas* oxidan el NH_4^+ a NO_2^- y utilizan los e^- de la oxidación del NH_4^+ como fuente de energía:



En la segunda etapa, las bacterias del género *Nitrobacter* oxidan el NO_2^- a NO_3^- , utilizando los e^- de la oxidación del NO_2^- como fuente de energía:



A su vez, las bacterias quimioautótrofas que utilizan la oxidación del amonio a nitrato como fuente de energía, requieren del CO_2 de la atmósfera del suelo o iones HCO_3^- como sustrato obligado para su crecimiento (Kinsbursky y Saltzman, 1990; Grant, 1994). El CO_2 utilizado, proviene en parte de la descomposición de la materia orgánica realizada por microorganismos heterótrofos y hongos (Paul y Clark, 1989). Por otra parte algunas especies de *Nitrobacter* oxidadoras de nitrito pueden utilizar fuentes orgánicas para su crecimiento (Kinsbursky y Saltzman, 1990).

Otro tipo de nitrificación que ocurre en la naturaleza, se conoce como nitrificación heterotrófica. Esta se lleva cabo por la vía de los compuestos hidroximatos y los compuestos de nitrógeno primarios que generan NO_2^- y NO_3^- , pero no energía libre. Algunas bacterias heterótrofas y también algunos actinomicetes son capaces de generar trazas de NO_2^- , cuando se tienen en medios de cultivo que contienen NH_4^+ . Pocas bacterias como *Arthrobacter* y pocos hongos, tal como *Aspergillus flavus*, pueden producir NO_3^- a partir de NH_4^+ . Los heterótrofos no derivan energía de estas oxidaciones y su contribución a la producción de NO_3^- en los suelos agrícolas y en los ecosistemas naturales parece ser insignificante si se compara con la nitrificación producida por los quimioautótrofos (Paul y Clark, 1989).

1.1.4.2 Importancia

La importancia del proceso de nitrificación radica fundamentalmente en: **1)** el NH_4^+ y el NO_3^- involucrados en el proceso, el primero como sustrato y el segundo como producto constituyen las formas minerales de N disponibles para las plantas que determinan en gran parte la fertilidad de los suelos y también ambos compuestos pueden ser inmovilizados por los microorganismos del suelo como parte fundamental de su biomasa (Paul y Clark, 1989; Grant, 1994; Woomeer y Swift, 1994; Sarmiento, 1995; Sarmiento y Bottner, 2002; Machado, 2005; Hoyle et al., 2006); **2)** tanto el NH_4^+ como el NO_3^- , pueden perderse de los ecosistemas, principalmente por volatilización en el caso del NH_4^+ y por lixiviación y desnitrificación en el caso del NO_3^- , dependiendo de las condiciones ambientales (Sarmiento, 1984; Paul y Clark, 1989; Watzka et al., 2006). Estas pérdidas constituyen por una parte una fuente de contaminación ambiental y por otra disminuyen la eficiencia en la utilización de los fertilizantes nitrogenados suministrados en los agroecosistemas (Sarmiento, 1995; Smith y Smith, 2002; Abreu, 2004; Machado, 2005; Abreu et al., 2007). En este sentido una porción considerable de los fertilizantes nitrogenados se puede perder en forma de NO_3^- por lixiviación (Sarmiento, 1984; Ünlü et al., 1999; Halitligil et al., 2002; Abreu, 2004; Machado, 2005; Abreu et al., 2007), pasando a las aguas subterráneas o a través de la escorrentía y llegando, de esta manera a los ecosistemas acuáticos, reduciendo la calidad de las aguas e impactando la vida acuática al inducir a la eutroficación de dichos

ambientes. Por otro lado el exceso de nitrógeno no lixiviado como nitratos se puede perder mediante la desnitrificación, aumentando así los niveles atmosféricos de óxido nitroso e hiponitroso. A estas entradas a la atmósfera se suman las del nitrógeno procedente de los residuos de los animales de cría intensiva en granjas, las de las plantas de tratamiento de aguas residuales e industrias de producción de fertilizantes químicos. Aunque los óxidos nitrosos son relativamente poco reactivos, pueden permanecer en la atmósfera, moviéndose lentamente hacia la estratosfera, donde en presencia de la radiación ultravioleta, reaccionan con el ozono para producir dióxido de nitrógeno, lo que contribuye a la destrucción de la capa de ozono por medio de la reacción: $\text{NO} + \text{O}_3 \rightleftharpoons \text{NO}_2 + \text{O}_2$ (con una capacidad de reacción 100 veces mayor que los compuestos fluorcarbonados) favoreciendo al calentamiento global. Además el N_2O también favorece al calentamiento global por su efecto invernadero. En la troposfera, el NO puede reaccionar con O_2 para formar NO_2 , el cual a este nivel tiene un comportamiento diferente y también nocivo, pues reacciona con el oxígeno en presencia de luz y produce ozono que resulta perjudicial ($\text{NO}_2 + \text{O}_2 \rightleftharpoons \text{NO} + \text{O}_3$) (Smith y Smith, 2002). A su vez el NO_2 reacciona con oxígeno y agua para producir HNO_3 que precipita como lluvia ácida, la cual además de ser corrosiva, representa un aporte de nitrógeno que puede alterar algunos ecosistemas al introducir niveles elevados de un nutriente limitante que promueve el crecimiento de algunas formas vegetales, y por otro lado conduce al declive y muerte de otras especies, disminuyendo así la diversidad en los ecosistemas (Sarmiento, 1984; Sutton, 1998; Smith y Smith, 2002).

Por estas razones la nitrificación constituye un proceso que puede contribuir a controlar tanto la disponibilidad de N en el suelo para las plantas como también las pérdidas en los ecosistemas naturales y agroecosistemas.

1.1.4.3 Factores que influyen en el proceso de nitrificación

La magnitud del proceso de nitrificación depende directamente de numerosos factores edáficos, tales como: concentración de N-NH_4^+ , concentración de CO_2 , pH, aireación, humedad, temperatura, contenido de materia orgánica (Hattori, 1973; Paul y Clark, 1989; Machado, 2005). Otros a su vez actúan indirectamente, como la capacidad de intercambio catiónico (CIC) y la textura del suelo.

1.1.4.3.1. Concentración de NH_4^+ . En el campo la concentración de NH_4^+ varía en un amplio rango (Paul y Clark, 1989). A menos que se aplique fertilizante nitrogenado, la concentración de NH_4^+ en el suelo es usualmente baja, debido a que el NH_4^+ , que se produce progresivamente por la mineralización de la materia orgánica por parte de los microorganismos del suelo, es absorbido por las plantas. En estas condiciones, la cinética de la nitrificación depende de la concentración del NH_4^+ y por lo tanto depende de la actividad de los microorganismos amonificadores (o descomponedores). En general, es la mineralización y por lo tanto la formación de NH_4^+ el paso limitante que controla la tasa de nitrificación y generalmente la cinética es de primer orden. En cambio cuando se aplican fertilizantes amoniacales al suelo, el proceso de nitrificación ocurre con una cinética de orden cero en la que la concentración de NH_4^+ no influye en la velocidad (Paul y Clark, 1989). Cuando existen niveles altos de NH_4^+ los nitrificantes autótrofos tienden a disminuir estos niveles (Verstraete, 1981b), al utilizar el NH_4^+ como fuente de energía.

1.1.4.3.2 Concentración de CO_2 . En experimentos de incubación de suelos realizados en condiciones de laboratorio con envases cerrados, Kinsbursky y Saltzman (1990) encontraron que al medir la respiración edáfica usando trampas alcalinas (NaOH) que capturan el CO_2 respirado, la concentración de CO_2 disminuyó dentro de estos envases y las tasas de nitrificación se redujeron considerablemente. Por otra parte, Azam et al. (2004), al incubar muestras de suelo en tratamientos con y sin trampa de NaOH y con y sin suministro de paja de trigo encontraron que: 1) en los suelos con trampas se redujo la nitrificación respecto a los suelos sin trampas; 2) en los suelos con trampa la nitrificación fue mayor en los tratamientos con paja de trigo que sin paja de trigo, posiblemente debido a un aumento en la concentración de CO_2 por la descomposición del sustrato orgánico. Además, Azam et al. (2005), al incubar muestras de suelo durante 20 días a 30 °C utilizando envases no herméticos con y sin trampas de NaOH, encontraron que la concentración de CO_2 en el aire dentro de los envases con trampa disminuyó en un 96% y simultáneamente la nitrificación se redujo significativamente, en relación a las medidas en los envases sin trampa, demostrando la dependencia de la nitrificación a la disponibilidad de CO_2 en el aire. Todos estos resultados indican que la concentración de CO_2 en la atmósfera del suelo es un factor

determinante sobre la nitrificación, encontrándose que a menor concentración de CO_2 disminuye la nitrificación.

1.1.4.3.3 pH. Existe una correlación entre la producción del NO_3^- y la acidez del suelo. En suelos agrícolas las tasas de nitrificación disminuyen marcadamente por debajo de pH 6,0 y se hacen despreciables por debajo de pH 4,5. Por otro lado, a un pH muy alto, el NH_4^+ se transforma en NH_3 , que se pierde por volatilización, lo cual trae como consecuencia que se inhibe la nitrificación (Paul y Clark, 1989). En el mismo sentido, Fuentes et al. (2006) informan de un incremento en el contenido de NO_3^- , al aumentar el pH desde 4,9 hasta 7,7 por encalado con CaCO_3 .

1.1.4.3.4 Aireación. La oxidación de NO_2^- a NO_3^- por *Nitrobacter* también involucra O_2 , cuyo papel es el transporte de electrones, por esta razón la aireación es esencial para la nitrificación. La difusión de O_2 en el suelo es controlada por la humedad y la estructura del mismo (Paul y Clark, 1989), por lo tanto actividades agrícolas como el arado o labranza y el riego que afectan la aireación del suelo en los agroecosistemas pueden afectar la nitrificación (Smith y Smith, 2002). Sin embargo los nitrificantes requieren menos O_2 que otros microorganismos aeróbicos ya que el K_m (constante de concentración de Michaelis) de los nitrificantes va de 0,3 a 1,0 mg L^{-1} , mientras que la de los otros es aproximadamente 0,03 mg L^{-1} , por lo tanto la nitrificación se vera afectada solamente a concentraciones muy bajas de O_2 (Verstraete, 1981b).

1.1.4.3.5 Humedad. Debido a que el contenido de agua en el suelo afecta su aireación, también influye en la producción de NO_3^- . La sobresaturación de agua limita la difusión de O_2 y por lo tanto, la nitrificación se suprime. En el otro extremo, la proliferación de las bacterias se retarda cuando el agua es insuficiente. Los niveles óptimos de humedad varían de acuerdo al tipo de suelo, pero en la mayoría, la nitrificación procede fácilmente desde -0,1 a -1 MPa. En general las reacciones de mineralización que producen NH_4^+ son menos sensibles que la nitrificación a la pérdida de agua, y por lo tanto, el NH_4^+ se acumula más que el NO_3^- en suelos con déficit hídrico (Paul y Clark, 1989). La capacidad de retener agua de un suelo depende de factores tales como la textura y el contenido de MOS (Casanova,

2005). Los cultivos usualmente afectan el contenido de agua en el suelo. La actividad de labranza aumenta el área de la superficie de partículas y agregados expuesta a la interfaz suelo-atmósfera, y por lo tanto aumenta el potencial para la evaporación y la pérdida de agua. En este sentido varios autores estudiaron las relaciones cuantitativas entre los efectos de la labranza y el agua perdida por evaporación bajo ciertos niveles de evaporación potencial. En general se encuentra que la labranza tiende a secar el suelo (Power, 1981). Por lo tanto las prácticas de labranza, al afectar el contenido de agua del suelo, indirectamente influyen sobre la nitrificación.

1.1.4.3.6 Temperatura. La temperatura también afecta marcadamente la nitrificación. El proceso es lento por debajo de 5 °C y por encima de 40 °C; en este rango la nitrificación aumenta linealmente con la temperatura. El óptimo está alrededor de 30 °C a 35 °C (Cookson et al., 2002; Hoyle et al., 2006). En suelos incubados a 5 °C, el NH_4^+ disponible es inmovilizado y por encima de los 20 °C se tiene que la nitrificación es el principal proceso que controla el consumo del NH_4^+ en suelos semiáridos (Hoyle et al., 2006). En áreas templadas, la nitrificación es mayor en primavera y otoño y menor en verano e invierno (Paul y Clark, 1989). Según Power (1981), en los sistemas de cultivos frecuentemente la temperatura del suelo se ve afectada por la colocación de residuos de cosecha. El residuo que queda sobre la superficie actúa como aislante y frecuentemente disminuye la temperatura del suelo en comparación con los casos donde los residuos se entierran. Por lo tanto la colocación de residuos sobre la superficie del suelo o enterrados afecta la temperatura del suelo y en consecuencia la nitrificación. El cultivo también produce una ruptura mecánica y modifica las unidades estructurales del suelo, generalmente incrementando la porosidad y afectando así el contenido de humedad, y la conductividad térmica que en última instancia influye sobre la temperatura del suelo (Power, 1981) y por lo tanto en la nitrificación.

1.1.4.3.7 Materia Orgánica del Suelo (MOS). La actividad de los microorganismos heterótrofos del suelo está limitada por la disponibilidad de compuestos orgánicos, es decir, compuestos de C. La presencia de compuestos lábiles o fácilmente descomponibles en la MOS puede favorecer la nitrificación, debido a la mineralización y producción de NH_4^+ . La

adición al suelo de compuestos orgánicos, puede afectar las tasas de nitrificación dependiendo de si estos favorecen la amonificación (producción de NH_4^+) o la inmovilización (consumo de NH_4^+) de N (Gibbs y Barranlough, 1998, citado por Hoyle et al., 2006). Así por ejemplo, Cookson et al. (2002), informaron que los contenidos de NO_3^- en el suelo aumentan con la incorporación de abono verde de trébol debido a la baja relación C/N de este substrato que favorece la mineralización del N en forma de NH_4^+ y la subsiguiente nitrificación de este.

1.1.4.3.8 Textura del Suelo. El NH_4^+ , al igual que otros cationes, puede adsorberse al complejo de intercambio catiónico orgánico mineral, estableciéndose un equilibrio entre el NH_4^+ adsorbido y la solución del suelo. Sin embargo, en algunos casos la arcilla como componente textural del suelo, pueden causar que el NH_4^+ quede fijado en forma mucho más permanente dentro de las redes cristalinas de estos silicatos secundarios que se originan durante los procesos de meteorización y pedogénesis. En este caso el NH_4^+ estructural se reintegrará al ciclo únicamente al descomponerse estos silicatos, y la nitrificación puede verse limitada (Sarmiento, 1984). En este sentido la proporción de NH_4^+ fijado que es liberado, es dependiente entre otras cosas, de la composición mineralógica del material y del grado en que la capacidad de fijación es saturada por el NH_4^+ . A su vez el ión NH_4^+ atrapado entre las capas de arcillas puede reemplazarse lentamente por cationes que provocan una expansión del espacio entre las capas, como los iones Na^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} . El NH_4^+ no puede ser reemplazado por cationes que contienen las capas de las redes cristalinas, como por ejemplo el K^+ (Nömmik, 1981). La fijación del NH_4^+ en los minerales de arcillas puede tener una significancia agronómica en la reacción de nitrificación influyendo sobre el ciclado de nitrógeno en el suelo (Nömmik, 1981).

1.2 Antecedentes

1.2.1 Historia de los sistemas de producción agrícola en los Andes venezolanos

En los valles altos de la cuenca del río Chama, en los Andes venezolanos, a lo largo del gradiente altitudinal de los 2000 a 3800 msnm, desde tiempos precolombinos hasta el presente la agricultura ha tenido un proceso histórico de cambios. Los valles altos y bolsones intermontanos secos representaron las áreas más aptas para el desarrollo de cultivos implementados por la cultura aborígen. En el piso andino, por debajo de los páramos, se desarrolló una agricultura basada principalmente en el cultivo de tubérculos como papa, ulluco y oka (Monasterio, 1980). Posteriormente, a partir del siglo XV, en los tiempos de la colonia, los españoles implementaron una agricultura cerealera, siendo el principal cultivo el trigo. Debido al creciente asentamiento poblacional, se incrementó la superficie de tierra utilizada, ocupando el trigo las laderas con fuertes pendientes y suelos frágiles, iniciándose un proceso de erosión y degradación potenciado por el pastoreo del ganado ovino, vacuno y equino introducido por los españoles (Monasterio, 1980). El ciclo triguero tuvo su auge durante los siglos XVI, XVII y se prolongo hasta 1850 (Carnevali, 1944), presentando una fase óptima de producción y comercialización de unos 200 años de duración (Monasterio, 1980). El cultivo de trigo decayó debido a que disminuyó la productividad de las cosechas como consecuencia de la degradación de los suelos y a que el cultivo en estas laderas no pudo competir rentablemente con la producción masiva de USA y Canadá. Durante el siglo XIX y la primera mitad del siglo XX en el piso superior de los Andes venezolanos se estableció un sistema de producción basado principalmente en el cultivo de papa y en forma complementaria cereales para el autoconsumo (trigo, avena, cebada) y algunos granos como la arveja. Este manejo campesino se caracterizó, por la existencia de dos fases en el ciclo agrícola. La primera fase de cultivo con una ó dos cosechas de papa y una de trigo. En la segunda fase, el terreno es dejado en descanso, se recupera la fertilidad del suelo y ocurre una sucesión ecológica que tiende a la regeneración de la vegetación natural. La duración del proceso sucesional es aparentemente muy variable (entre dos y más de veinte años) dependiendo de las características de cada parcela y de la disponibilidad de tierras del campesino (Sarmiento y Monasterio, 1993). Este sistema de manejo ha ido desapareciendo poco a poco hasta nuestros días.

Durante la década de 1950-1960, como consecuencia del creciente proceso productivo petrolero desarrollado en Venezuela, inmigrantes, procedente principalmente de las Islas Canarias, iniciaron en esta zona andina un proceso de desarrollo agrícola basado en la explotación intensiva de tubérculos y hortalizas que sustituyó a los cultivos tradicionales de trigo y arveja cambiando el rumbo de la agricultura venezolana (Monasterio, 1980; Romero, 2005). Estos productores canarios implementaron nuevas técnicas de preparación de la tierra, mecanización, riego por aspersión, utilización de semillas importadas de distintas variedades de papa blanca (*Solanum tuberosum*) y de hortalizas mejoradas, como también el empleo de fertilizantes minerales, plaguicidas y biocidas (Machado, 2005; Romero, 2005). Este patrón fue adoptado y generalizado entre los productores locales para lograr altos rendimientos productivos, lo cual significó una revalorización tanto del sistema agrícola andino como del productor (Monasterio, 1980; Romero, 2005).

A partir de 1989 los agricultores sometidos a presiones económicas, debidas fundamentalmente a los bajos precios de sus productos y al aumento de los precios de los insumos agrícolas, han empleado la intensificación, con la utilización de tecnologías modernas como estrategia para aumentar la productividad económica de sus cultivos (Arias, 1996; Gutiérrez, 1996; Velásquez, 2001). Esta ha consistido principalmente en tratar de lograr mayores rendimientos de cosecha por superficie cultivada y por año. Para ello los agricultores recurren: al empleo de semillas certificadas de variedades de alto rendimiento, a la reducción o eliminación de los períodos de descanso o barbecho para aumentar el uso temporal de las parcelas agrícolas y al suministro de mayores cantidades de agua para riego. Este patrón de modernización ha requerido el empleo de mayores cantidades de fertilizantes químicos amoniacales y de enmiendas orgánicas principalmente estiércol de aves de corral (gallinazo) y cáscara de arroz (CORPOANDES, 1995; Machado, 2005).

1.2.2 El uso actual de la tierra

Actualmente en los Andes venezolanos es difícil definir cual es la forma tradicional de manejo de los recursos, ya que históricamente lo más constante ha sido el propio cambio y las diversas influencias externas o las sucesivas invasiones, colonizaciones e

inmigraciones que actuaron desde el comienzo como motores de transformación. Lo que complica aun más la situación es que el cambio se ha producido en forma desfasada y desigual, dependiendo por un lado del grado de aislamiento geográfico y por otro de las condiciones y potencialidades ecológicas de cada región. El hecho concreto es que en la actualidad coexisten en los Andes venezolanos toda una gama de sistemas agrícolas que va desde aquellos de corte más tradicional, familiares, pasando por una serie de sistemas transicionales, hasta los netamente modernos, con asalariados permanentes, mecanizados y de altos insumos (Sarmiento y Monasterio, 1993).

Así mismo se puede encontrar un espectro muy amplio de suelos dependiendo de su historia de uso, así como del grado de intensificación actual en cuanto a la cantidad de insumos empleados. Sin embargo, en base a esto, se puede decir que una importante proporción de los suelos agrícolas de la zona alta (entre los 2400 y 3800 msnm) en los Páramos de Mérida, en base a su historia de manejo pueden considerarse como:

- 1- Suelos ocupados por una agricultura tradicional transicional de producción de papa y cereales que utiliza la práctica del descanso prolongado (más de cuatro años) como estrategia de recuperación de la fertilidad de los suelos.
- 2- Suelos que fueron sometidos al cultivo de trigo durante más de 100 años y que como consecuencia sufrieron un fuerte proceso de erosión y degradación.
- 3- Suelos en los que durante los últimos 20 años se viene realizando una agricultura intensiva caracterizada por el empleo de biocidas y plaguicidas, riego por aspersión, importantes cantidades de fertilizantes minerales y de enmiendas orgánicas y frecuente encalado.

1.2.3 Fertilizantes minerales y enmiendas orgánicas

En Venezuela los fertilizantes minerales nitrogenados que se fabrican son amoniacales, tales como urea, sulfato de amonio y fosfato diamónico, en cambio los nitratos son importados. Actualmente en los Andes venezolanos los agricultores, además de

emplear importantes cantidades de fertilizantes minerales, los combinan también con grandes cantidades de enmiendas orgánicas, lo cual se ha convertido en una práctica necesaria para aumentar y sostener los rendimientos de cosecha (Machado, 2005). La función primordial de estas enmiendas es compensar la pérdida de fertilidad de los suelos que en la agricultura tradicional era restablecida, en parte, mediante los períodos de descanso (Sarmiento, 1995; Llambí, 1997; Sarmiento y Bottner, 2002; Machado, 2005).

Las enmiendas orgánicas más utilizadas en la agricultura intensiva andina son el gallinazo o estiércol de aves de corral y la cáscara de arroz (pargana), debido a que se producen a escala industrial y los rendimientos de cosecha obtenidos con estos residuos, resultan satisfactorios (Machado, 2005). En cuanto a las cantidades de gallinazo utilizadas en el cultivo de papa, se tiene información (Machado, 2005) de suministros que oscilan entre 10 y 30 Mg ha⁻¹ año⁻¹ de gallinazo los cuales se reparten según el número de ciclos de cultivos realizados, en una a tres dosis aplicadas antes de la siembra. En cuanto a la pargana se utilizan cantidades que oscilan entre 30 y 90 Mg ha⁻¹ para dos ciclos de cultivos (CORPOANDES, 1995), en combinación con el gallinazo y/o fertilizante mineral. En relación a la fertilización mineral son frecuentes aplicaciones entre 150 y 300 kg N ha⁻¹ para cada cultivo que pueden ser repartidas entre la siembra y el aporque.

1.3 Justificación del estudio de la nitrificación

Agren y Bosatta (1996) definen la ecología ecosistémica como la subdisciplina que estudia la transformación, flujo y acumulación de energía y materia. El conocimiento de los factores y procesos que determinan el flujo de nutrientes entre los distintos compartimentos de un agroecosistema y entre éste y el ambiente que lo rodea, constituye la base fundamental para entender su funcionamiento y por lo tanto, se requiere de un enfoque ecosistémico para analizar el problema de la optimización del uso del N (Machado, 2005). Considerando que la nitrificación constituye un proceso clave en el ciclo del N, que puede regular el balance de N en los agroecosistemas andinos venezolanos, el cual presenta una alta dependencia del suministro de grandes cantidades de fertilizantes amoniacales y gallinazo, se justifica el estudio de este proceso.

Kinsbursky y Saltzman (1990) demostraron la sensibilidad de la nitrificación al CO_2 , atribuible a que el CO_2 es un sustrato esencial para el crecimiento de las bacterias nitrificantes autótrofas, mientras que el NH_4^+ es la fuente de la energía (Grant, 1994).

Por otra parte en cuanto a la composición del gallinazo, como sustrato orgánico, éste presenta un alto contenido de compuestos orgánicos hidrosolubles, aminoácidos y aminoazúcares (Beloso, 1991). Machado (2005) encontró que, en incubaciones de suelo con sustratos realizadas en condiciones de laboratorio, en el caso del gallinazo, en comparación con la cáscara de arroz, durante la etapa inicial se producen importantes cantidades de CO_2 (Fig. 2), atribuible a la descomposición de estos compuestos orgánicos fácilmente metabolizables por parte de los microorganismos heterótrofos del suelo que al descomponerlos liberan CO_2 . Estos sustratos orgánicos lábiles, tienden a agotarse relativamente rápido (aproximadamente en 2 semanas), quedando un material orgánico más estable que se decompone lentamente (Beloso, 1991; Contreras, 2002; Machado, 2005).

En base a las ideas expuestas anteriormente, se plantean las siguientes hipótesis.

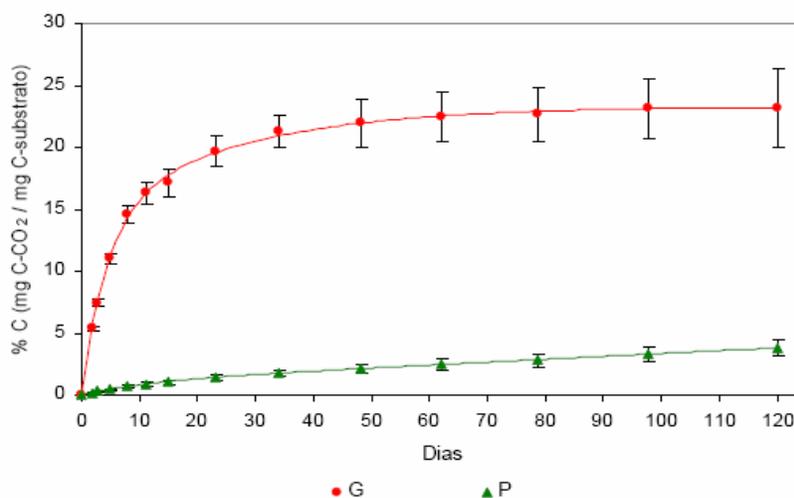


Figura 2. Dinámica de la liberación de C durante la descomposición de dos sustratos contrastantes, gallinazo (G) y cáscara de arroz (P), expresada como un coeficiente acumulado de mineralización (mg de C-CO_2 liberado acumulado por cada 100 mg de $\text{C}_{\text{sustrato}}$), tomado de Machado (2005).

2. Hipótesis

- I. El gallinazo podría favorecer el proceso de nitrificación porque promueve la producción de CO₂ por parte de los microorganismos heterótrofos del suelo, siendo este CO₂ utilizado por los microorganismos nitrificantes (quimioautótrofos) como fuente de C para incorporarlo a su biomasa.
- II. Dado que el proceso de nitrificación depende de las propiedades físico-químicas de los suelos, tales como: pH, textura, MOS y contenido de nutrientes; se espera que el porcentaje de nitrificación y la respuesta al gallinazo sean distintos en suelos con características físico-químicas diferentes.

Para comprobar estas hipótesis se plantea alcanzar los objetivos que se presentan a continuación.

3. Objetivos

3.1 Objetivo general

Evaluar el efecto del suministro del gallinazo sobre el proceso de nitrificación en algunos suelos agrícolas contrastantes de los páramos andinos, como una contribución al conocimiento de los mecanismos que regulan la disponibilidad y pérdidas de nitrógeno.

3.2 Objetivos específicos

- Evaluar el efecto del suministro de gallinazo sobre el porcentaje de nitrificación en tres suelos de páramo con distintas historias de manejo y diferentes características físico-químicas: suelo con descansos largos, suelo degradado y un suelo con manejo intensivo, incubados bajo condiciones controladas de laboratorio.

- Determinar la respiración edáfica en términos de la cantidad de C-CO₂ liberado en los tres suelos con y sin suministro de gallinazo incubados bajo las mismas condiciones controladas de laboratorio.
- Relacionar los % de nitrificación con la cantidad de C-CO₂ liberada en los tres suelos seleccionados.

4. Aplicabilidad de los resultados

Los resultados obtenidos permitirán un mejor entendimiento de los procesos que regulan el complejo balance del N en los agroecosistemas. Este conocimiento puede contribuir en el futuro, por ejemplo mediante su incorporación en modelos de simulación de cultivos, a plantear posibles prácticas de manejo que promuevan una mayor eficiencia en el uso del N por parte de los cultivos y menores pérdidas de compuestos nitrogenados, las cuales traen consecuencias negativas desde el punto de vista económico y ambiental. El hecho de estudiar, en tres suelos contrastantes permitirá aplicar los resultados a diferentes situaciones y evitar generalizaciones que pudieran ser erróneas en regiones con alta heterogeneidad edáfica.

5. Metodología

La metodología empleada consistió en realizar incubaciones de tres tipos de suelo en condiciones controladas de laboratorio con suministro de NH₄⁺, con y sin suministro de gallinazo, midiendo el contenido de N en forma de amonio (N-NH₄⁺) y de N en forma de nitrito + nitrato (N-NO₃⁻) en el suelo y la cantidad de CO₂ respirado, a lo largo de incubaciones de 24 días de duración.

5.1 Área de estudio

Se utilizaron tres suelos de los Páramos de Mérida, localizados alrededor de los 3000 msnm, en el valle alto del río Chama, en el Municipio Rangel del estado Mérida, Venezuela (Fig. 3), el cual constituye uno de los centros principales del cultivo de papa en la región. Se seleccionaron tres suelos con historias de manejo diferentes los cuales fueron descritos anteriormente:

1. Suelo bajo una agricultura tradicional transicional que utiliza la práctica de descanso prolongado. Debido a que el suelo seleccionado tenía aproximadamente 20 años de descanso y presentaba una vegetación de rosetal-arbustal característica del ecosistema de páramo, lo denominaremos: suelo de páramo manejado con descansos largos o simplemente para abreviar, suelo de páramo (SP).
2. Suelo que fue sometido al cultivo de trigo durante más de 100 años. Debido a que este suelo ha sufrido intensos procesos de erosión y degradación y está cubierto con vegetación degradada, lo llamaremos: suelo degradado (SD).
3. Suelo en el cual desde hace 20 años ó más se viene realizando una agricultura intensiva. Por esta razón este suelo lo nombraremos como: suelo agrícola con manejo intensivo o simplemente para abreviar, suelo agrícola (SA).

Los tres suelos seleccionados son altamente contrastantes debido en gran parte al efecto de sus diferentes historias de manejo, que han influido sobre sus características fisicoquímicas (Tabla 1), además de las diferencias producto de sus distintos procesos y tiempo de pedogénesis, lo cual permitió evaluar la hipótesis II.

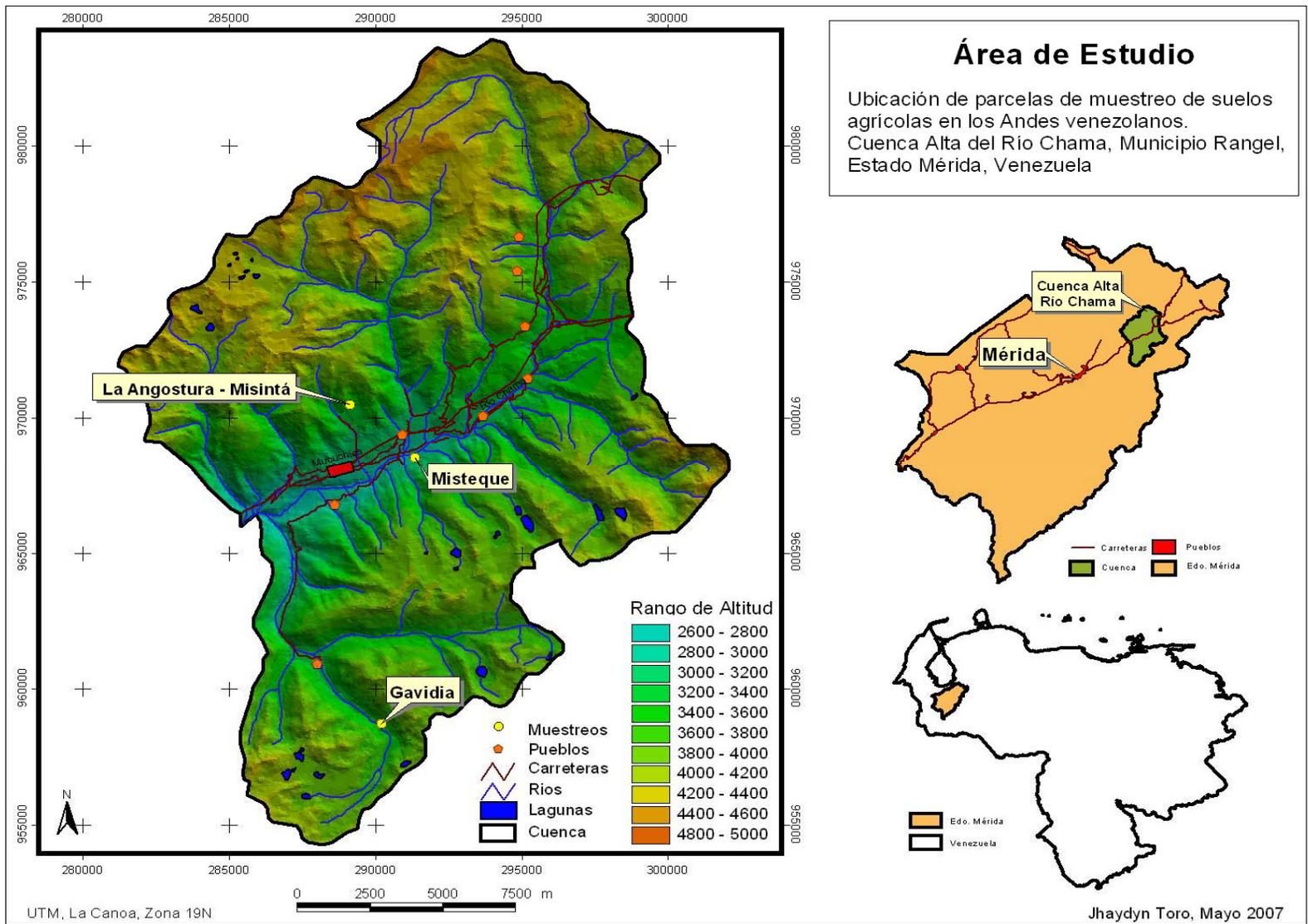


Figura 3. Ubicación del área de muestreo de los suelos en estudio: Gavidia (SP), La Angostura-Misintá (SD) y Mistique (SA); Cuenca alta del Río Chama, Municipio Rangel, Estado Mérida, Venezuela.

5.2 Caracterización de los suelos

Los suelos fueron recolectados por Felicien (2005) de la siguiente manera, se delimitó una parcela de aproximadamente 1000 m² en cada uno de los lugares de estudio seleccionados, la parcela se dividió en tres subparcelas, de cada una de las cuales se obtuvo una muestra de suelo compuesta, recolectada en 10 puntos seleccionados al azar, donde se extrajo con pala, suelo de la capa 0 a 15 cm de profundidad. Cada muestra compuesta fue tamizada en campo a 4 mm y homogenizada. En cada muestra compuesta (3 para cada tipo de suelo) se realizaron los análisis físico-químicos que permitieron su caracterización (Tabla 1).

Tabla 1.

Principales características físico-químicas de los suelos agrícolas (0-15 cm de profundidad) estudiados en este trabajo. SP: Suelo de páramo con descanso largo (Gavidia), SD: Suelo degradado (Angostura-Misintá), SA: Suelo agrícola con manejo intensivo (Misteque). A: arcillas, l: limo, a: arena, C/N: relación carbono nitrógeno, N total: nitrógeno total, C.O: carbono orgánico, CC: capacidad de campo, PMP: punto de marchitamiento permanente, Bases Intercambiables: Ca, Mg, Na y K; Σ Bases: sumatoria de bases, % SB: porcentaje de saturación de bases, CIC: capacidad de intercambio catiónico. Análisis realizados en el Laboratorio de Suelos del Instituto de Geografía y Conservación de los Recursos Naturales Renovables, Facultad de Ciencias Forestales y Ambientales, ULA. Los valores entre paréntesis corresponden al error estándar. Letras distintas indican diferencias significativas entre las medias de los suelos ($n = 3$; $P < 0,05$; Prueba de Tukey o Prueba de Dunnett), NS: no significativo. Tomado de Felicien (2008).

SUELO	pH	Textura (%)			C/N	N total (%)	C. O. (%)	CC 1/3 ATM (%)	PMP 15 ATM (%)
		A	l	a					
SP	4,97 (0,04)c	8,00 (2,45)b	32,00 (2,45) ^{NS}	60,00 (1,07)a	14,93 (1,48) ^{NS}	0,51 (0,03)a	7,82 (1,16)a	32,33 (1,21)a	19,99 (0,53)a
SD	5,80 (0,06)b	16,67 (0,82)a	28,67 (0,82) ^{NS}	54,67 (0,76)b	13,94 (0,69) ^{NS}	0,09 (0,01)c	1,48 (0,11)c	17,55 (0,41)c	8,39 (0,15)c
SA	7,37 (0,06)a	17,33 (0,00)a	26,67 (0,82) ^{NS}	56,00 (2,14)ab	12,96 (0,69) ^{NS}	0,28 (0,04)b	3,63 (0,45)b	24,15 (1,63)b	14,26 (2,12)b

SUELO	Bases Intercambiables (meq/100g)				Σ Bases (meq/100g)	SB (%)	CIC (meq/ 100g)
	Ca	Mg	Na	K			
SP	2,80 (1,18)b	0,43 (0,24)b	0,04 (0,01)b	0,37 (0,09)b	3,64 (1,51)b	16,85 (8,15)c	21,58 (1,29)a
SD	3,20 (0,50)b	1,21 (0,07)b	0,03 (0,004)a	0,29 (0,05)b	4,73 (0,51)b	54,12 (3,56)b	8,75 (0,76)b
SA	12,53 (1,33)a	2,52 (0,24)a	0,13 (0,02)a	2,10 (0,38)a	17,28 (1,87)a	94,76 (6,97)a	18,24 (2,14)a

Estas características físico-químicas (Tabla 1), informadas por Felicien (2008), fueron determinadas en el laboratorio de suelos, Instituto de Geografía y Conservación de los Recursos Naturales Renovables, Facultad de Ciencias Forestales y Ambientales, Universidad de Los Andes: pH (1:1 suelo en agua) por potenciometría; contenido de C orgánico por el método de Walkley-Black (IGCA, 1978); contenido de Ca, Mg, K y Na disponibles (extraíbles en acetato de amonio 1M y pH 7) por espectrofotometría de absorción atómica (IGCA, 1978); Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC) por extracción con acetato de amonio 1M y pH 7 (IGCA, 1978); textura por Bouyoucos (1962); Capacidad de campo por retención de agua a 1/3 atm y Punto de marchitamiento permanente por retención de agua a 15 atm (Klute, 1986).

5.2.1 Suelo de páramo manejado con descansos largos

El suelo de páramo manejado con descansos largos (SP) se recolectó de un terreno ubicado en las coordenadas 8° 40' 05" N y 70° 54' 24" O, a los 3560 msnm en el valle de Gavidia, estado Mérida. El área de muestreo, con pendiente de 15°, se sitúa sobre un valle que ha sufrido un intenso geomorfismo de modelado glacial y fluvial (Aranguren y Monasterio, 1997). El lugar de muestreo se caracteriza por presentar una precipitación promedio anual de 1380 mm y una temperatura media anual de 8 °C (Sarmiento, 1995; Llambí y Sarmiento, 1998).

La parcela seleccionada fue cultivada con el sistema agrícola tradicional con descansos largos. Actualmente tiene más 20 años en descanso y está cubierta con vegetación de páramo producto de la sucesión ocurrida desde que fue abandonada. Las características principales de este suelo son: pH ácido, alto contenido de materia orgánica y bajo porcentaje de saturación de bases, textura principalmente arenosa (Tabla 1), considerándose estos suelos como poco fértiles (Sarmiento, 1995; Llambí, 1997; Abreu, 2004; Felicien, 2005). Sin embargo, tal como lo informa Felicien (2008), el SP presenta una alta capacidad de intercambio catiónico, y altos puntos de capacidad de campo y de marchitez permanente (Tabla 1). En base al sistema de clasificación del Soil Taxonomy corresponde a un *Ustic Humitrocept* (Llambí y Sarmiento, 1998).

5.2.2 Suelo degradado

El suelo degradado (SD) se recolectó de un terreno ubicado en la localidad de La Angostura-Misintá, situado cerca de la población de Mucuchíes. Fue sometido durante el periodo triguero a cultivos sucesivos de este cereal los cuales se realizaban sin fertilizaciones ni aportes de enmiendas orgánicas externas, iniciándose un proceso de erosión y degradación, el cual se incrementó por el pastoreo de ganado realizado desde hace más de 50 años cuando dejó de cultivarse. Debido a este manejo la vegetación sólo ha recolonizado parcialmente, presentándose con una cobertura baja y con una composición diferente a la del páramo natural a pesar de que se abandonó hace más de 50 años (Sarmiento et al., 2005; Sarmiento y Smith, 2008). La parcela de estudio se localizó sobre una ladera con pendiente de 37° situada entre las coordenadas 8° 46' 30" N y 70° 55' 00" O, a 3450 m de altitud. Entre las características climáticas destacan una precipitación promedio anual de 640 mm y una temperatura media anual de 8,1 °C. Este es un suelo altamente compactado, pobre en nutrientes, con baja fertilidad, textura principalmente arenosa, poca materia orgánica, pH un poco menos ácido que el anterior, baja capacidad de retención de agua y baja capacidad de intercambio catiónico (Tabla 1) y según el sistema de clasificación del Soil Taxonomy pertenece al orden *Entisol* (Sarmiento et al., 2005).

5.2.3 Suelo agrícola con manejo intensivo

El suelo representativo del sistema agrícola intensivo (SA), se recolectó de una finca productora de papas ubicada en la localidad de Misteque (8° 46' N y 70° 54' O) también cerca de la población de Mucuchíes en el estado Mérida, Venezuela, a una altitud de 2960 msnm, con precipitación promedio anual de 640 mm, evaporación promedio anual en tina de 1416 mm y temperatura media anual de 11,1 °C. En esta finca, y en la zona circundante, se cultiva papa (una o dos cosechas por año) en rotación con hortalizas (ajo, zanahoria, repollo, coles) con alto empleo de insumos. El terreno seleccionado tiene pendiente de 23° y se localiza sobre un abanico situado en el fondo del valle del río Chama (Machado, 2005).

Las características fisicoquímicas de este suelo son: pH cercano a la neutralidad, textura franco arenosa, alto contenido de bases intercambiables (Tabla 1), debido al manejo intensivo que ha implicado la utilización de grandes cantidades de cal agrícola y fertilizantes tanto minerales como orgánicos: gallinazo y pargana (Machado, 2005), y por otro lado, presenta alto porcentaje de saturación de bases (Tabla 1). De acuerdo al sistema de clasificación Soil Taxonomy el suelo es un *Antropic Ustumbrept* (Machado, 2005).

Aun cuando los suelos estudiados fueron seleccionados e identificados en base a sus historias de manejo y uso actual, es de hacer notar que sus distintas características fisicoquímicas se deben no solamente a las diferencias en cuanto a la actividad antrópica desarrollada, sino evidentemente a diferencias en los distintos factores que actúan para formar un suelo: tipo de material parental, clima, topografía, vegetación y tiempo. Sin embargo, la idea en este trabajo fue analizar el efecto del gallinazo sobre el proceso de nitrificación en suelos agrícolas con características fisicoquímicas contrastantes agrupadas estas como un sólo factor llamado “tipo de suelo” en este estudio. Por otra parte en la selección de estos tres suelos también influyó el hecho de que los mismos están siendo objeto de estudio en otros proyectos (Felicien, 2008; Sarmiento y Smith, 2008), lo cual permite completar y reforzar su estudio.

5.3 Caracterización del substrato gallinazo

El gallinazo utilizado en las incubaciones fue analizado, tal como lo informa Felicien (2008), determinando nitrógeno total por el método de digestión y destilación de Kjeldahl (Bremner y Mulvaney, 1982; Acevedo, 1994) y su contenido de C orgánico por el método de Walkley Black (IGCA, 1978). Estas propiedades químicas del gallinazo se muestran en la Tabla 2. Por otro lado, en el presente trabajo se determinó el contenido de N en forma de amonio ($N-NH_4^+$) y en forma de nitritos + nitratos ($N-NO_3^-$) por el método de extracción con K_2SO_4 , destilación y titulación (Rojas y Castillo, 1989; Acevedo, 1994) y el pH (1:5 suelo en agua) por el método potenciométrico (Jackson, 1976). Estas determinaciones se realizaron en el Laboratorio de Análisis Químico del ICAE y los resultados se muestran también en la Tabla 2. Con esta misma metodología, la cual se detalla más adelante, se determinaron los contenidos iniciales (N_0) de $N-NH_4^+$ y $N-NO_3^-$ en los suelos, como también los contenidos en los distintos tiempos de incubación.

Tabla 2.

Características químicas principales del substrato gallinazo: C.O.: carbono orgánico, N total: nitrógeno total, C/N: relación carbono nitrógeno, N-NH⁺₄: contenido de N en forma de amonio, N-NO⁻₃: contenido de N en forma nitrato y nitrito y pH (1:5 substrato en agua). Los valores entre paréntesis corresponden a la desviación normal (*n* = 3). **A**: Análisis realizado en el Laboratorio de Suelos del Instituto de Geografía y Conservación de los Recursos Naturales Renovables, Facultad de Ciencias Forestales y Ambientales, ULA. **B**: Análisis realizado en el Laboratorio de Análisis Químico del Instituto de Ciencias Ambientales y Ecológicas (ICAE), Facultad de Ciencias, ULA. Tomado de Felicien (2008). **E**: Análisis determinado en este trabajo, realizado en el Laboratorio de Análisis Químico del Instituto de Ciencias Ambientales y Ecológicas (ICAE), Facultad de Ciencias, ULA.

Substrato	C. O. g Kg ⁻¹ A	N total g Kg ⁻¹ B	C/N	N-NH ⁺ ₄ g Kg ⁻¹ E	N-NO ⁻ ₃ g Kg ⁻¹ E	pH (1:5) E
Gallinazo	241,9 (3,0)	16,6 (0,2)	14,57	2,19 (0,05)	0 (0)	8,98 (0,08)

5.4 Diseño experimental

Cada tipo de suelo, el suelo de páramo con descanso largo (SP), el suelo degradado (SD) y el suelo agrícola con manejo intensivo (SA) fue incubado bajo dos tratamientos:

- Sin suministro de gallinazo (S - G).
- Con suministro de gallinazo (S + G).

Por lo tanto, el diseño experimental consistió en un arreglo factorial con 2 factores: **1)** suministro de gallinazo, con 2 tratamientos: con gallinazo (+G) y sin gallinazo (-G) y **2)** tipos de suelo, con 3 tipos: SP, SD y SA. Siendo el % de nitrificación y la cantidad (mg Kg⁻¹) de C-CO₂ liberado las variables dependientes evaluadas.

Todos los tratamientos recibieron 10 mg de N-NH⁺₄ (1 ml de solución 10 g de N-NH⁺₄ L⁻¹) para 50 g de suelo seco (200 mg de N-NH⁺₄ Kg⁻¹ de suelo seco) como fuente de energía para los microorganismos nitrificantes (Kandeler, 1996). En el caso de los suelos sin gallinazo estos 10 mg de N-NH⁺₄ se aplicaron en forma de (NH₄)₂SO₄, mientras que en el caso de los suelos con gallinazo se aplicaron 9,126 mg de N-NH⁺₄ en forma de

$(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ y 0,874 mg de N-NH_4^+ contenidos en el gallinazo suministrado (Tabla 3). La dosis de gallinazo aplicada a los suelos con el tratamiento de este substrato fue de 0,400 g para 50 g de suelo seco (8,00 g de gallinazo Kg^{-1} de suelo seco). Esta dosis equivale a una aplicación en campo de 10,08 Mg de gallinazo ha^{-1} considerando que se distribuye en una capa de suelo de 0 a 10 cm de profundidad.

Tabla 3.

Cantidad de: la fuente $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ y gallinazo, aplicada (g/50g ss); la fuente de N aplicada equivalente en campo (Mg ha^{-1}); N-NH_4^+ aportada por la fuente (mg N-NH_4^+ /50g ss); N-NH_4^+ total aplicado (mg N-NH_4^+ /50g ss); N-NH_4^+ total (mg N-NH_4^+ / Kg^{-1} ss) y N-NH_4^+ total aplicada equivalente en campo ($\text{Kg N-NH}_4^+ \text{ha}^{-1}$). Las cantidades aplicadas equivalentes en campo fueron calculadas considerando que las fuentes de N-NH_4^+ ($(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ y gallinazo) se distribuyen en una capa de suelo de 0 a 10 cm de profundidad con una densidad aparente de $1,26 \text{g cm}^{-3}$.

Cantidades de N y de las fuentes aplicadas	Tratamientos			
	S - G		S + G	
	$(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$	Gallinazo	$(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$	Gallinazo
Cantidad de la fuente de N (g /50g ss)	0,047	0	0,043	0,400
Cantidad de la fuente de N equivalente en campo (Mg ha^{-1})	1,19	0	1,08	10,08
Cantidad de N-NH_4^+ aportada por la fuente (mg N-NH_4^+ /50g ss)	10	0	9,126	0,874
Cantidad total de N-NH_4^+ (mg N-NH_4^+ /50g ss)	10		10	
Cantidad total de N-NH_4^+ (mg N-NH_4^+ / Kg^{-1} ss)	200		200	
Cantidad total equivalente de N-NH_4^+ en campo ($\text{Kg N-NH}_4^+ \text{ha}^{-1}$)	252		252	

5.5 Incubaciones

A los fines de la incubación, para cada tipo de suelo, se mezclaron y se homogenizaron pesos iguales del suelo recolectado en cada una de las tres subparcelas correspondientes. A cada tipo de suelo se le determinó el contenido relativo de humedad

(CRH) por el método gravimétrico, secando el suelo a 105 °C durante 24 horas, con el fin de determinar la cantidad de suelo húmedo equivalente a 50 g de suelo seco y para determinar la cantidad de agua necesaria para llevar la humedad a 80% de la capacidad de campo.

Para cada muestra (réplica) se pesó una cantidad de suelo fresco equivalente a 50 g de suelo seco y se colocó en un frasco de un litro con tapa hermética, seguidamente se agregó la cantidad de $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ y gallinazo correspondiente. El $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ empleado fue reactivo grado analítico marca Merck. El gallinazo empleado fue gallinazo comercial marca Fertiagro, del cual se tomaron porciones al azar del empaque original y se mezclaron hasta homogenizar, luego se pesaron porciones individuales de 0,400 g del substrato para suministrar a los respectivos frascos.

Las muestras de suelo con sus tratamientos fueron homogenizadas, humedecidas con un dispensador de agua hasta un contenido de humedad de 80% de su respectiva capacidad de campo y nuevamente homogenizadas.

Los suelos fueron incubados en el laboratorio, en una cámara en la oscuridad, a una temperatura constante de $28 \pm 1^\circ\text{C}$. Para mantener las condiciones aeróbicas se abrieron los frascos y se controló la humedad del suelo una vez por semana añadiendo agua de ser necesario (Paul y Clark, 1989; Alef, 1995; Öhlinger, 1996).

Para la determinación del nitrógeno mineral, se incubaron 28 muestras de suelo por tratamiento para cada tipo de suelo: 4 réplicas de suelo x 7 muestreos (destrutivos) x 2 tratamientos (con y sin gallinazo) = 56 frascos. En total para los 3 tipos de suelo fueron 168 muestras en las cuales se determinó el contenido de N-NH_4^+ y de NO_3^- en cada una de ellas.

Para la determinación (no destructiva) de CO_2 , se incubaron 8 réplicas de suelo por tratamiento para cada tipo de suelo: 8 réplicas x 2 tratamientos (con y sin gallinazo) + 8 blancos = 24 frascos. En cada uno de estos frascos se colocaron recipientes con solución de

NaOH para la captura del CO₂ (trampas). En total para los 3 tipos de suelo se utilizaron 72 frascos x 7 muestreos no destructivos = 504 determinaciones de C-CO₂.

Dado que las trampas de NaOH absorben el CO₂ del aire contenido dentro de los frascos, el aire en los suelos con trampa tiene una concentración de CO₂ menor que el aire de la atmósfera y menor que la del aire contenido en los frascos sin trampas (Kinsbursky y Saltzman, 1990; Azam et al., 2005). Por lo tanto los suelos con trampas se pueden considerar como deficitarios de CO₂ y los frascos sin trampas con concentración mayor de CO₂ (Kinsbursky y Saltzman, 1990; Azam et al., 2004; Azam et al., 2005). Es por ello que al analizar el efecto de las trampas sobre la nitrificación se está evaluando el efecto de la concentración de CO₂. Con este fin se determinó el contenido de N-NH₄⁺ y el contenido de N-NO₃⁻ en 4 de los frascos que tenían trampas (+T) de NaOH para la captura de CO₂, de cada uno de los suelos y tratamientos. Esta determinación destructiva se realizó después de retiradas las trampas en el último muestreo efectuado a los 24 días de la incubación. Es decir se tomaron: 4 réplicas de suelo con trampa de NaOH (+T) x 2 tratamientos x 3 tipos de suelo = 24 frascos en total analizados para evaluar el efecto de las trampas sobre la nitrificación.

En la figura 4 se presenta un esquema general de los métodos utilizados en este Trabajo Especial de Grado.

Metodología general del T.E.G.

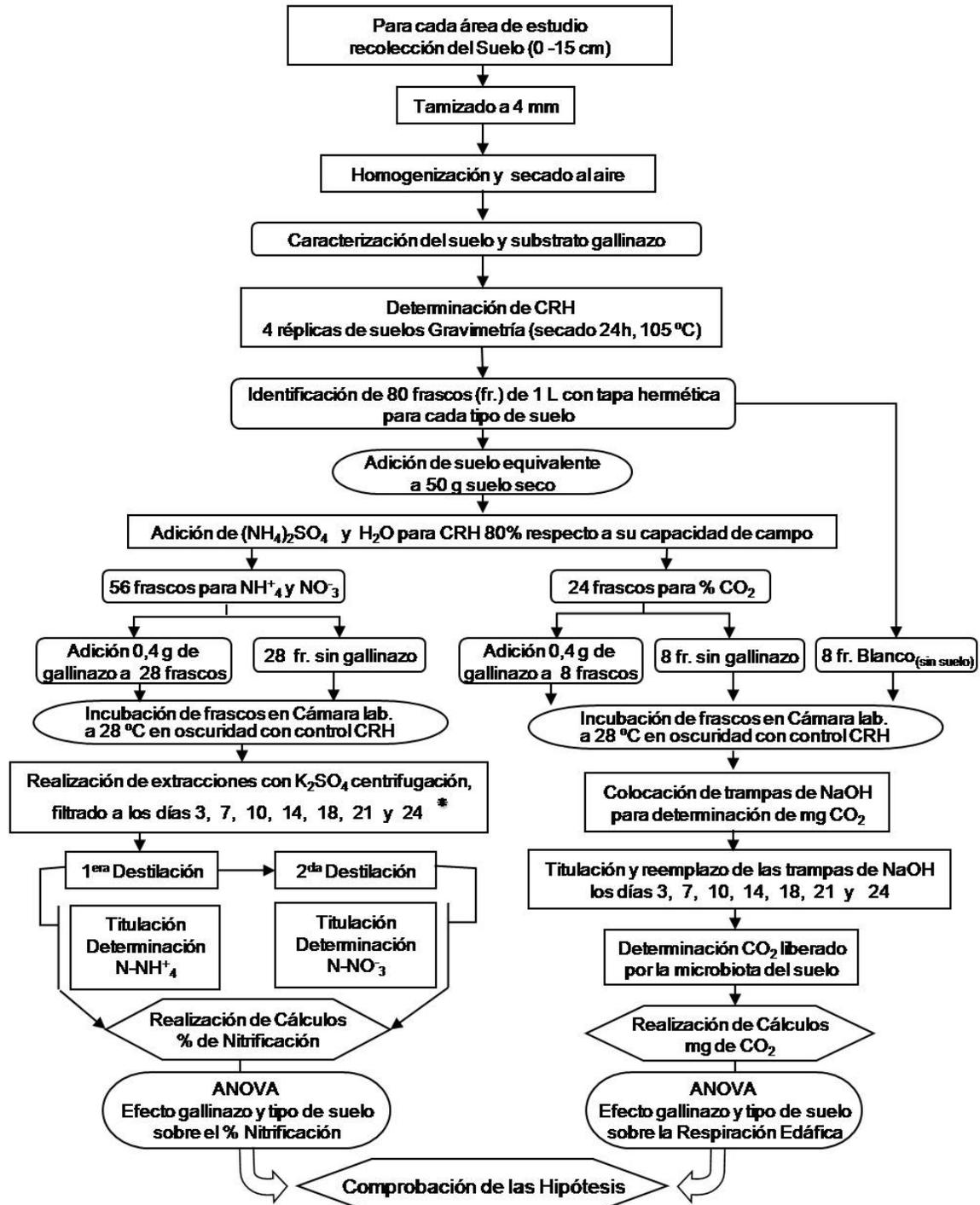


Figura 4. Esquema general de los métodos del Trabajo Especial de Grado: Efecto del suministro de Gallinazo sobre el proceso de nitrificación, en suelos agrícolas de los Andes venezolanos. CRH: contenido relativo de humedad. * El día 24 se realizaron extracciones con K_2SO_4 a 4 frascos con gallinazo y 4 sin gallinazo de los que habían tenido trampa de NaOH para la determinación del CO_2 respirado, a los cuales se les determinó el contenido de NH_4^+ y NO_3^- .

5.6 Mediciones

5.6.1 Contenido de N-NH₄⁺ y de N-NO₃⁻

Las cantidades de N en forma de amonio (N-NH₄⁺) y en forma de nitratos + nitritos (N-NO₃⁻), fueron determinadas en 4 réplicas por tratamiento en muestreos destructivos realizados a los 3, 7, 10, 14, 18, 21 y 24 días de incubación. Para ello todo el suelo (equivalente a 50 g de peso seco) de cada frasco, fue extraído con 150 ml de solución de K₂SO₄ 0,5 M, seguidamente se sometió a agitación mecánica durante 30 minutos y centrifugación a 6000 rpm durante 20 minutos, luego se filtró y se tomó el volumen del sobrenadante. Los extractos fueron congelados para su posterior análisis. En una alícuota de 80 ml de este extracto se determinó el contenido de N-NH₄⁺ por destilación, previa adición de aproximadamente 3 g de MgO. Se recolectó el amonio destilado en trampas con 20 ml de solución H₃BO₃ al 20%, y luego el contenido de N-NO₃⁻ se analizó añadiendo 0,3 g de aleación Devarda para reducir los nitratos a amonio y realizando una segunda destilación. El amonio destilado se determinó por titulación potenciométrica (pH = 5,32) con H₂SO₄ (Rojas y Castillo, 1989; Acevedo, 1994). Los contenidos de N-NH₄⁺ y N-NO₃⁻ en el suelo se calcularon por medio de la ecuación (Ec. 1):

$$\text{mg N Kg}^{-1} \text{ suelo seco} = ((V_{\text{H}_2\text{SO}_4\text{M}} * N_{\text{H}_2\text{SO}_4\text{M}} * (V_{\text{K}_2\text{SO}_4} + (\text{PSH} - \text{PSS}))/V_{\text{Mdest}}) - (V_{\text{H}_2\text{SO}_4\text{B}} * N_{\text{H}_2\text{SO}_4\text{B}} * V_{\text{K}_2\text{SO}_4})/V_{\text{Bdest}})) * (\text{PEN} * 1000\text{g Kg}^{-1})/\text{PSS} \quad (\text{Ec. 1})$$

Donde:

$V_{\text{H}_2\text{SO}_4\text{M}}$ = Volumen (ml) de H₂SO₄ utilizado para valorar el NH₃ destilado del extracto de la muestra.

$N_{\text{H}_2\text{SO}_4\text{M}}$ = Normalidad (meq/ml) de la solución de H₂SO₄ utilizada para titular la muestra.

$V_{\text{K}_2\text{SO}_4}$ = Volumen (ml) de solución extractante de K₂SO₄.

PSH = Peso (g) de suelo húmedo.

PSS = Peso (g) de suelo seco.

V_{Mdest} = Volumen (ml) de extracto de la muestra destilado.

$V_{\text{H}_2\text{SO}_4\text{B}}$ = Volumen (ml) de H₂SO₄ utilizado para titular el NH₃ destilado del blanco (solución extractante de K₂SO₄).

$N_{H_2SO_4B}$ = Normalidad (meq/ml) de la solución de H_2SO_4 utilizada para titular el blanco.

V_{Bdest} = Volumen (ml) del blanco (solución extractante de K_2SO_4) destilado.

PEN = Peso equivalente del N = 14,007 mg/meq.

En la figura 5 se presenta un esquema del método utilizado para la determinación del contenido de $N-NH_4^+$ y de $N-NO_3^-$.

5.6.2 CO_2 liberado

El C- CO_2 liberado entre dos muestreos consecutivos se evaluó para cada suelo en 8 réplicas por tratamiento, utilizando en cada frasco con suelo una trampa con 25 ml de solución de NaOH para capturar el CO_2 . Para la preparación de la solución de NaOH en cada muestreo su concentración fue calculada previendo la neutralización del 25 al 75% del NaOH de la trampa debida al CO_2 (Alef, 1995; Öhlinger, 1996). Se utilizaron como blancos 8 frascos con trampa pero sin suelo. Las trampas se remplazaron a los: 3, 7, 10, 14, 18, 21 y 24 días. El CO_2 liberado se determinó por titulación; para ello, se tomó una alícuota de 5 ml de la solución de NaOH de la trampa, se le adicionó 2,5 ml de solución de $BaCl_2$ al 20%, se añadió 38 ml de agua destilada y se tituló con solución valorada de H_2SO_4 hasta $pH = 7$; determinado por potenciometría. La cantidad de CO_2 liberado del suelo de cada frasco en los distintos periodos de tiempo, fue calculada por diferencia respecto al promedio de los blancos por medio de la ecuación 2. En la figura 6 se presenta un esquema para la determinación del CO_2 liberado en cada periodo de tiempo.

$$\text{mg C-CO}_2/\text{Kg suelo seco} = (V_{H_2SO_4B} - V_{H_2SO_4M}) * N_{H_2SO_4} * PEC * 100 \quad (\text{Ec. 2})$$

Donde:

$V_{H_2SO_4B}$ = Volumen promedio (ml) de H_2SO_4 utilizado para titular el NaOH de las trampas de los blancos.

$V_{H_2SO_4M}$ = Volumen (ml) H_2SO_4 utilizado para titular el NaOH de la trampa de la muestra.

$N_{H_2SO_4}$ = Normalidad (meq/ml) de la solución titulante de H_2SO_4 .

PEC = Peso equivalente del C = 6,005 mg/meq.

$$100 = \text{Factor} = \frac{1000 \text{ g suelo seco}}{50 \text{ g suelo seco (muestra)}} \times \frac{25 \text{ ml solución NaOH en la trampa}}{5 \text{ ml alícuota titulada}}$$

Cabe resaltar que al utilizar frascos con tapa hermética en experimentos de incubación de suelos en laboratorio, se debe considerar que para mantener las condiciones aeróbicas, los frascos deben abrirse a intervalos que impidan que la concentración de O₂ caiga por debajo de 10 % (Paul y Clark, 1989). En este sentido para constatar la condición de aerobiosis de las muestras de suelos, se determinó la concentración del O₂ remanente en el frasco después de los primeros 7 días de incubación. Para ello se calculó el número de moles de O₂ inicialmente presente en los frascos, utilizando la ecuación de los gases ideales ($PV = nRT$, donde $P = 0,815 \text{ atm}$; $V = 1\text{L}$; $R = 0,082 \text{ atm L mol}^{-1} \text{ }^\circ\text{K}^{-1}$ y $T = 28 \text{ }^\circ\text{C} = (301 \text{ }^\circ\text{K})$) y considerando una concentración de 21 % de O₂ en el aire. A ésta cantidad se le restó el número de moles de O₂ consumido, los cuales se suponen, de acuerdo a Alef (1995), iguales al número de moles de CO₂ respirado por la microbiota del suelo, que fueron determinados experimentalmente mediante la captura del CO₂ en las trampas de NaOH.

5.6.3 pH de los suelos y del gallinazo

La determinación del pH de los suelos y del substrato gallinazo (pH_G) en este trabajo se realizó en el Laboratorio de Análisis Químico del ICAE, Facultad de Ciencias, ULA. Para cada tipo de suelo en estudio se midió el pH (pH_{Suelos - G}) y el pH del suelo con gallinazo (pH_{Suelo + G}) utilizando una cantidad de gallinazo proporcional a la aplicada en el experimento de incubación. Las medidas de pH fueron realizadas por triplicado por método potenciométrico utilizando una relación 1:5 suelo en agua (Jackson, 1976).

**Método para la determinación de N mineral
(Contenido de N-NH_4^+ y N-NO_3^-)
para cada tipo de suelo**

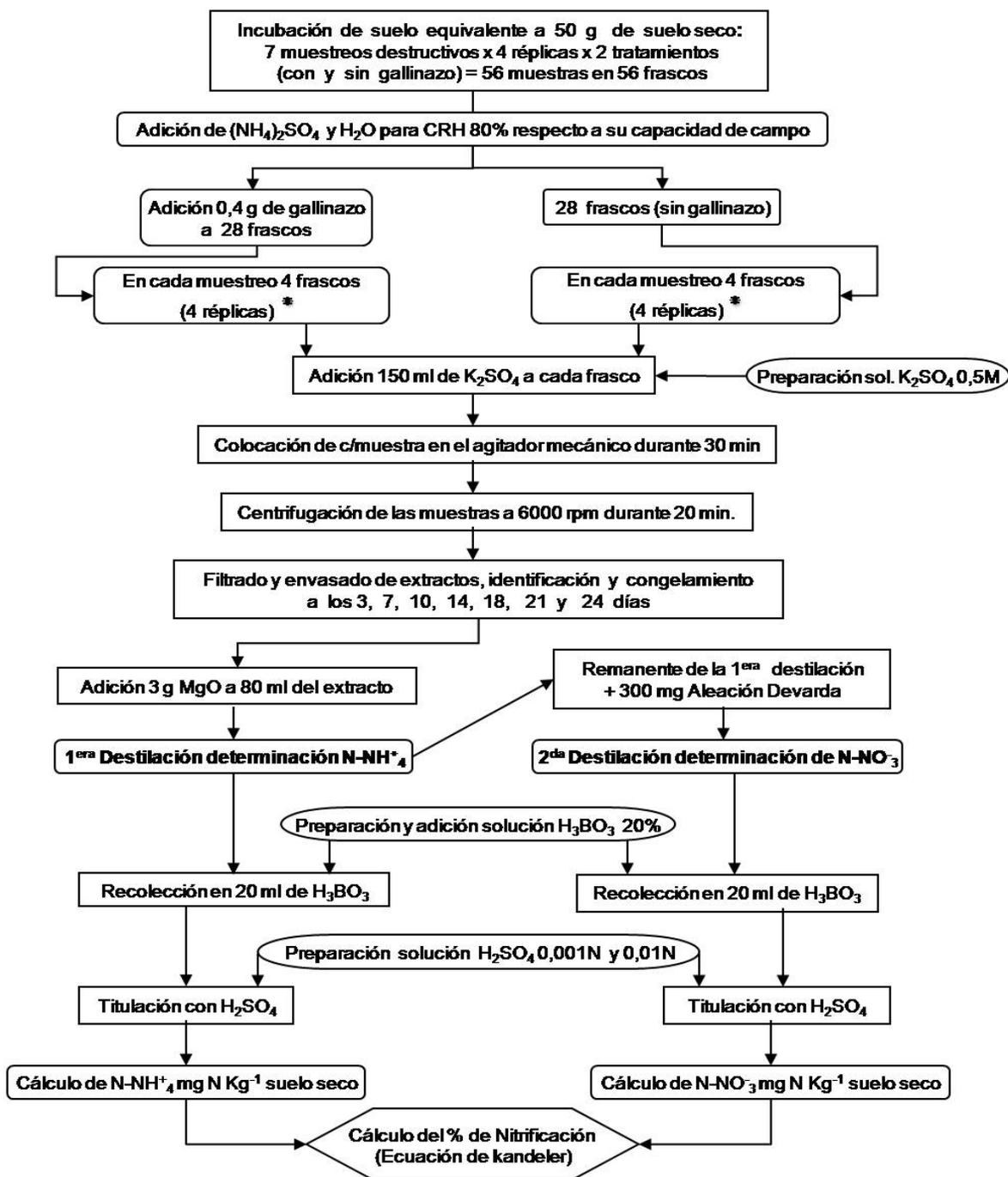


Figura 5. Esquema metodológico para la determinación de N mineral (Contenido de N-NH_4^+ y N-NO_3^-), Modificado a partir de Abreu (2004) y Felicien (2005). CRH: contenido relativo de humedad. * En el último muestreo (24 días) se tomaron 4 frascos con gallinazo y 4 sin gallinazo de los que habían tenido trampa de NaOH para la determinación del CO_2 respirado, a los cuales se les determinó el contenido de NH_4^+ y NO_3^- .

Método para la determinación del CO₂ liberado (Respiración edáfica) para cada tipo de suelo

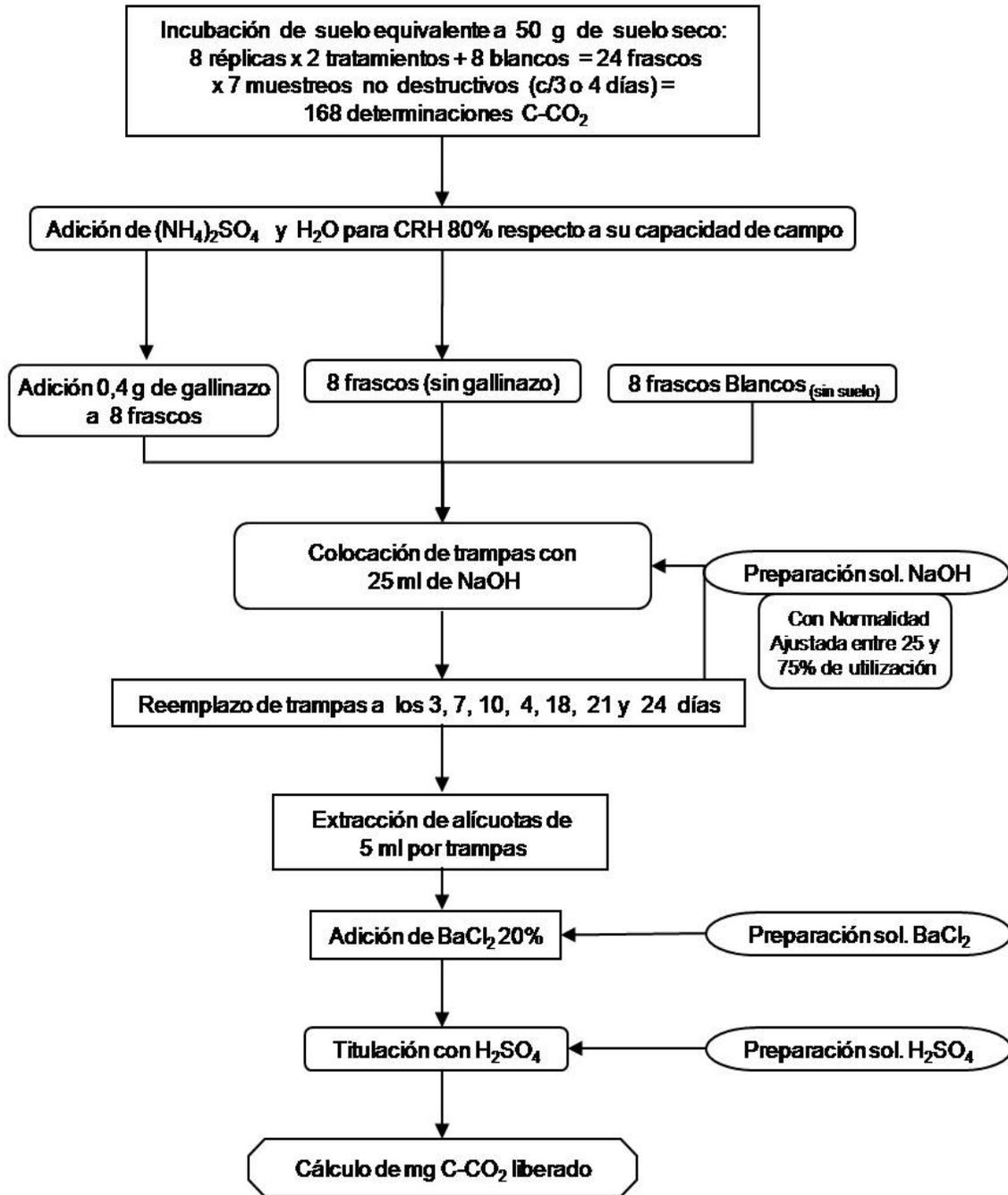


Figura 6. Esquema metodológico para la determinación del CO₂ liberado en cada suelo.

5.7 Materiales y equipos

Materiales

- 160 frascos de vidrio de 1 L con tapas herméticas.
- 56 recipientes para trampas de NaOH.
- Matraces aforados de distintas capacidades.
- Cilindros graduados.
- Tubos para destilación de NH₃.
- Pipetas volumétricas y graduadas
- Frascos plásticos para congelar extractos

Reactivos (grado analítico)

- (NH₄)₂SO₄
- NaOH
- K₂SO₄
- Aleación Devarda
- MgO
- H₃BO₃
- H₂SO₄
- BaCl₂

Equipos

- Cámara de incubación con regulación de temperatura.
- Agitador mecánico para extractos de suelo.
- Centrífuga.
- Trompa de vacío.
- Destilador automático.
- Titulador automático.
- Balanza electrónica.
- Micropipeta.

El experimento de incubación y los análisis de N-NH₄⁺, N-NO₃⁻ y de CO₂ se realizaron en los laboratorios del Instituto de Ciencias Ambientales y Ecológicas (ICAE) de la Universidad de Los Andes, utilizando los materiales y equipos de este laboratorio.

5.8 Procesamiento de datos

5.8.1 Nitrificación

El proceso de nitrificación se cuantificó por medio de la ecuación 3 (Kandeler, 1996):

$$\% \text{ Nitrif.} = 100 * (\text{N-NO}_3^-_{t_n} - \text{N-NO}_3^-_{t_o}) / [\text{N-NH}_4^+_{t_o} + (\text{Nmin}_{t_n} - \text{Nmin}_{t_o})] \quad (\text{Ec. 3})$$

Donde: % Nitrif. es la nitrificación porcentual durante un intervalo de tiempo ($t_n - t_o$ días), es decir el porcentaje de N-NH_4^+ que se transforma en N-NO_3^- ; $\text{N-NO}_3^-_{t_n}$ y $\text{N-NO}_3^-_{t_o}$ son las cantidades de N en forma de nitrato + nitrito a los t_n días y a los t_o días (inicio) de la incubación respectivamente; $\text{N-NH}_4^+_{t_o}$ es la cantidad de N en forma de amonio a los t_o días (inicio) de la incubación, calculado como la cantidad inicial (N_o) de N-NH_4^+ en el suelo + la cantidad de N-NH_4^+ añadida con los tratamientos ($200 \text{ mg N-NH}_4^+ \text{ Kg}^{-1}$) como se indicó en la tabla 3; Nmin_{t_n} y Nmin_{t_o} son las cantidades de N mineral ($\text{N-NH}_4^+ + \text{N-NO}_3^-$) a los t_n días y t_o días de la incubación respectivamente. Las cantidades de N se expresaron en: mg N kg^{-1} de suelo seco. El término Nmin_{t_n} y Nmin_{t_o} en el denominador se introduce para corregir la producción de N mineral por el proceso de mineralización de la MOS y de los substratos orgánicos y el consumo de N mineral en los procesos de inmovilización, volatilización y desnitrificación. El % de Nitrif se calculó a cada uno de los tiempos t_n : 3, 7, 10, 14, 18, 21 y 24 días de incubación.

5.8.2 Respiración edáfica

La cuantificación del proceso de respiración edáfica para los distintos suelos, se realizó de dos maneras:

1. Por periodos de tiempo. La cantidad de C-CO_2 respirado durante el periodo de tiempo transcurrido entre dos muestreos consecutivos, efectuados los días 3, 7, 10, 14, 18, 21 y 24 días después del inicio de la incubación.

Para cada periodo se calculó la media y la desviación normal de las 8 réplicas (frascos) de cada tratamiento (con y sin gallinazo), para cada suelo.

2. Acumulada en el tiempo. La respiración edáfica acumulada hasta cada uno de los días evaluados durante la incubación (3, 7, 10, 14, 18, 21 y 24 días) se calculó para cada frasco (réplica) como la suma de las cantidades de C-CO₂ liberadas durante los periodos transcurridos hasta el día correspondiente. Para cada día se calculó la media acumulada y la desviación normal de los 8 frascos (réplicas) de cada tratamiento (con y sin gallinazo) para cada suelo.

5.8.3 Mineralización del substrato gallinazo

La mineralización del C proveniente de la descomposición del substrato gallinazo (mg C-CO₂) acumulada hasta cada uno de los días evaluados (d) se determinó como la diferencia de la media de la respiración acumulada para el tratamiento con gallinazo menos la media de la respiración acumulada respectiva para el tratamiento sin gallinazo:

mg C-CO₂ min acum gallinazo (d) =

$$\text{mg C-CO}_2 \text{ resp acum S con G (d)} - \text{mg C-CO}_2 \text{ resp acum S sin G (d)} \quad (\text{Ec.4})$$

Donde:

mg C-CO₂ min acum gallinazo (d) = Cantidad acumulada (mg) de C-CO₂ respirado del substrato gallinazo en el día (d).

mg C-CO₂ resp acum S con G (d) = Cantidad acumulada (mg) de C-CO₂ respirado del tratamiento con gallinazo en el día (d).

mg C-CO₂ resp acum S sin G (d) = Cantidad acumulada (mg) de C-CO₂ respirado del tratamiento sin gallinazo en el día (d).

La desviación normal correspondiente a cada uno de los días se consideró igual a la obtenida para la respiración acumulada hasta el mismo día, del suelo con gallinazo

calculado como se indica en la sección anterior. La mineralización acumulada del C del substrato gallinazo fue calculada de esta forma para cada uno de los tres suelos.

5.9 Análisis de resultados

Para probar si se presentaban diferencias significativas en las distintas variables analizadas, % nitrificación, respiración y pH, debidas a los factores: tipo de suelo, gallinazo y tiempo, se realizaron análisis de varianza (ANOVA) utilizando el programa Microsoft® Office Excell® 2007. En los casos en que previamente se encontró heterogeneidad de las varianzas (Bartlett $P > 0,1$) se realizaron transformaciones logarítmicas. Las comparaciones de medias fueron realizadas a través de la prueba de “Tukey B” utilizando el programa SPSS 12.0 para Windows, Versión 12.00.

5.9.1 Efecto del gallinazo y del tipo de suelo sobre la nitrificación y la respiración

El efecto de los factores, gallinazo y tipo de suelo sobre la nitrificación y sobre la respiración edáfica se evaluó mediante análisis de varianza (ANOVA) de dos vías en cada uno de los tiempos de incubación. En el caso de la nitrificación además se realizaron ANOVA de dos vías, gallinazo y tiempo de incubación, para cada suelo. Mientras que en el caso de la respiración se realizaron ANOVA de una vía, gallinazo, para cada suelo en cada tiempo.

5.9.2 Relación entre nitrificación y respiración

5.9.2.1 Efecto de las trampas de NaOH sobre la nitrificación

Se realizó un ANOVA con dos factores, tratamiento con gallinazo (G) y trampa (T), para los resultados del % de nitrificación obtenidos para cada suelo con (+G) y sin (-G) gallinazo y con (+T) y sin (-T) trampa a los 24 días de incubación.

5.9.2.2 Relación entre el % de nitrificación y la cantidad de C-CO₂ respirada

Para evaluar la relación entre la nitrificación y la respiración edáfica se realizaron distintos tipos de gráficos:

1. Los % de nitrificación obtenidos a los distintos tiempos de incubación en relación a las cantidades acumuladas de C-CO₂ respiradas (mg C-CO₂ Kg⁻¹) correspondientes a esos mismos tiempos.
2. Las diferencias (Δ) del % de nitrificación de los tratamientos con y sin gallinazo en relación a las diferencias (Δ) de las cantidades acumuladas de C-CO₂ respiradas (mg C-CO₂ Kg⁻¹) de los tratamientos con y sin gallinazo correspondientes a esos mismos tiempos.

Con los valores graficados, se realizaron ajustes a modelos lineales y exponenciales y se determinaron los coeficientes de regresión correspondientes.

6. Resultados y análisis de los resultados

6.1 Resultados de la nitrificación

A continuación se presentan los resultados de los contenidos de N-NH_4^+ , N-NO_3^- y N mineral ($\text{N-NH}_4^+ + \text{N-NO}_3^-$) determinados, y de los porcentajes de nitrificación calculados, para los distintos suelos: suelo de páramo, suelo degradado y suelo agrícola. Es de hacer notar que los contenidos de N en forma de amonio y mineral, en el tiempo cero, $\text{N-NH}_4^+_{t0}$ y Nmin_{t0} fueron calculados como los contenidos de N iniciales (N_0) en cada suelo + la cantidad de N-NH_4^+ añadida ($200 \text{ mg de N-NH}_4^+ \text{ Kg}^{-1}$).

6.1.1 Suelo de Páramo

El contenido inicial de N-NH_4^+ en el suelo de páramo (Fig. 7A) resultó de $23,7 \text{ mg Kg}^{-1}$ aumentando a $223,7 \text{ mg Kg}^{-1}$ luego de la aplicación de los tratamientos y el contenido inicial de N-NO_3^- fue de $2,1 \text{ mg Kg}^{-1}$ (Fig. 7B). En la figura 7A se observa que la cantidad de N-NH_4^+ en este suelo con ambos tratamientos, con y sin suministro de gallinazo, aumentó de manera similar durante los primeros 7 días, posiblemente debido al proceso de amonificación del N orgánico del suelo y del gallinazo, luego tendió a estabilizarse alcanzando aproximadamente $300 \text{ mg de N-NH}_4^+ \text{ Kg}^{-1}$ a los 24 días.

En figura 7B, se observa que el contenido de N-NO_3^- en este suelo aumentó ligeramente desde $2,1 \text{ mg Kg}^{-1}$ al inicio, hasta aproximadamente $12,0 \text{ mg Kg}^{-1}$ a los 24 días. Durante la incubación los valores de N-NO_3^- en el suelo con gallinazo tendieron a ser mayores al los del suelo sin gallinazo. Es de hacer notar que como los contenidos de N-NH_4^+ resultaron mucho mayores que los de N-NO_3^- (Figs. 7A y 7B) entonces los contenidos de N mineral en este suelo (Fig. 7C), atribuibles principalmente al contenido de N-NH_4^+ , presentaron la misma tendencia que este último (Figs. 7A y 7C).

En la figura 7C se puede observar que el N mineral del suelo en ambos tratamientos aumentó durante la incubación como consecuencia de la mineralización del N orgánico contenido en el suelo y en el gallinazo. Por otra parte, en la figura 7D se muestran los porcentajes de nitrificación calculados a partir de la ecuación de Kandeler (Ec. 3). Se observa que el suelo con suministro de gallinazo presenta mayor porcentaje de nitrificación que el suelo sin gallinazo durante toda la incubación, excepto al final (24 días). Sin

embargo en este suelo se observa que la nitrificación es baja, alcanzando un valor máximo de 3,65% a los 24 días y de 3,76% a los 21 días, sin y con suministro de gallinazo respectivamente.

En la figura 7D se observa que a los 24 días de incubación los suelos con trampas de NaOH (T), mostraron menor porcentaje de nitrificación (T - G = 2,74 % y T + G = 3,05 %) respecto a los suelos sin trampa (-G = 3,65 % y +G = 3,13 %).

6.1.2 Suelo Degradado

El contenido inicial de N-NH_4^+ y el de N-NO_3^- en el suelo degradado presentaron valores muy bajos, de $2,4 \text{ mg Kg}^{-1}$ y menores que $0,1 \text{ mg Kg}^{-1}$ respectivamente (Figs. 8A y 8B). En la figura 6A, se observa que el contenido de amonio en este suelo, con ambos tratamientos disminuyó durante la incubación. El tratamiento con suministro de gallinazo presentó menor contenido de N-NH_4^+ respecto al tratamiento sin gallinazo.

En la figura 8B se observa que la cantidad de N-NO_3^- aumentó con el tiempo, diferenciándose notablemente para ambos tratamientos a partir de los 18 días de la incubación. A los 24 días de la incubación se encontraron contenidos de N-NO_3^- de 18,7 y 28,3 mg Kg^{-1} para los suelos sin y con gallinazo respectivamente. El tratamiento con suministro de gallinazo presentó mayor contenido de N-NO_3^- durante toda la incubación, posiblemente debido a que mayor cantidad de amonio se transformó en nitrato y por eso presentó menor contenido de N-NH_4^+ tal como se indicó anteriormente (Fig. 8A). Estas hipótesis se confirman en la figura 8D donde se aprecia mayor % de nitrificación en el suelo con gallinazo, especialmente a partir del día 18. Es de hacer notar que en este suelo se encontró mayor nitrificación que en el suelo de páramo (Figs. 8D y 7D) alcanzando valores de 9,2 y 14,3 % para los suelos sin y con gallinazo respectivamente al final de la incubación (24 días). En cuanto al contenido de N mineral (Fig. 8C) se observa una pequeña disminución durante los primeros 3 días y una tendencia gradual al restablecimiento del contenido inicial durante el resto de la incubación. Los suelos con y sin suministro de gallinazo presentaron valores similares.

Respecto al efecto de la trampa de NaOH para la captura de CO_2 (Fig. 8D) es notable que a los 24 días de incubación los suelos con trampa presentaron menor porcentaje de nitrificación (T - G = 4,20 % y T + G = 6,16 %) respecto a los suelos sin trampa (-G = 9,17 % y +G = 14,31%).

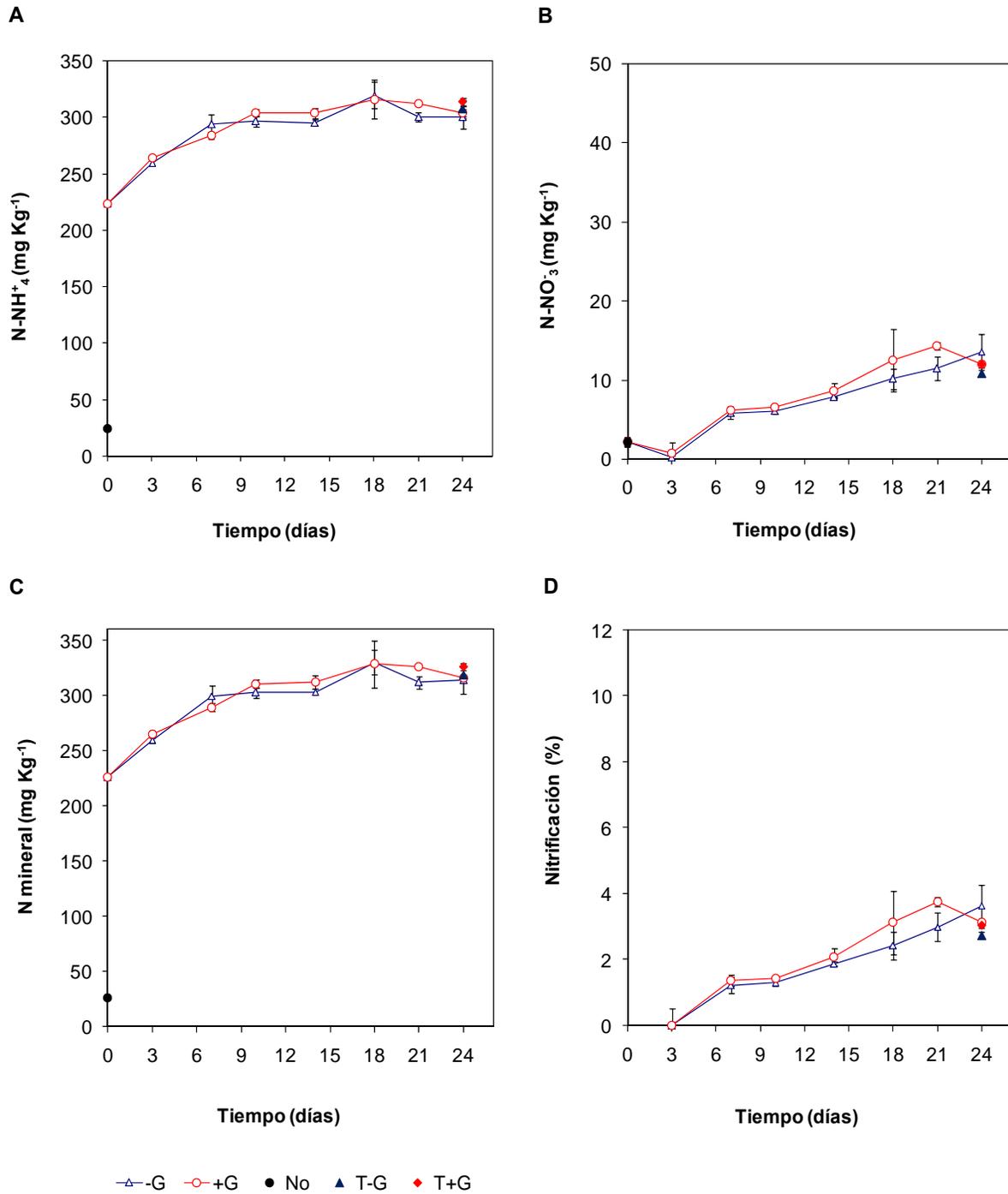


Figura 7. Curso con el tiempo (días) de incubación, de las cantidades de N en el suelo de páramo (mg Kg⁻¹) sin gallinazo (-G) y con gallinazo (+G). A. En forma de amonio (N-NH₄⁺). B. En forma de nitrato + nitrito (N-NO₃). C. Mineral y D. Porcentaje de N nitrificado (Nitrificación %). N₀ son las cantidades de N iniciales correspondientes. T-G y T+G son los valores determinados en suelos sin gallinazo (-G) y con gallinazo (+G) ambos con trampas de NaOH. Las barras representan los valores de la desviación normal (n = 4).

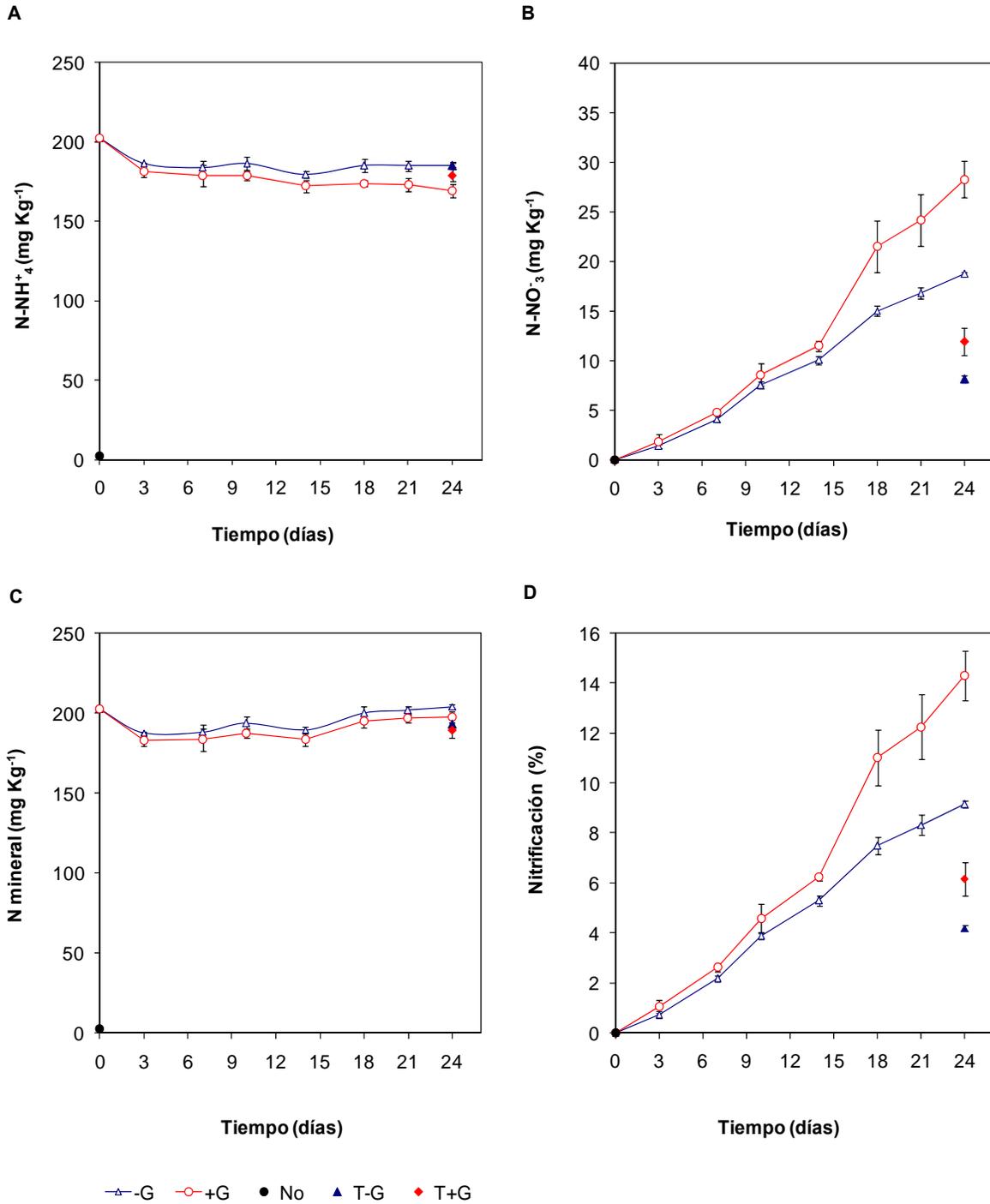


Figura 8. Curso con el tiempo (días) de incubación, de las cantidades de N en el suelo **degradado** (mg Kg⁻¹) sin gallinazo (-G) y con gallinazo (+G). A. En forma de amonio (N-NH₄⁺). B. En forma de nitrato + nitrito (N-NO₃). C. Mineral y D. Porcentaje de N nitrificado (Nitrificación %). N₀ son las cantidades de N iniciales correspondientes. T-G y T+G son los valores determinados en suelos sin gallinazo (-G) y con gallinazo (+G) ambos con trampas de NaOH. Las barras representan los valores de la desviación normal (*n* = 4).

6.1.3 Suelo Agrícola

En este suelo el contenido inicial de N-NH_4^+ fue $8,6 \text{ mg Kg}^{-1}$ (Fig. 9A), el cual representa un valor menor que el encontrado en el suelo de páramo ($23,7 \text{ mg Kg}^{-1}$) y mayor que el del suelo degradado ($2,4 \text{ mg Kg}^{-1}$). El contenido de N-NO_3^- , $10,9 \text{ mg Kg}^{-1}$ (Fig. 9B), resultó más elevado que el obtenido en los suelos degradado ($< 0,1 \text{ mg Kg}^{-1}$) y de páramo ($2,1 \text{ mg Kg}^{-1}$).

En la figura 9A, se observa que la cantidad de N-NH_4^+ en el suelo presentó un fuerte descenso durante los primeros 7 días de la incubación. En este periodo el contenido de N-NH_4^+ del suelo con gallinazo tendió a ser menor que el del suelo sin gallinazo. A partir del día 10 y hasta el final de la incubación las cantidades de N-NH_4^+ resultaron menores que $1,5 \text{ mg Kg}^{-1}$ para ambos tratamientos (Fig. 9A).

Respecto al contenido de N-NO_3^- (Fig. 9B), se observa para ambos tratamientos un importante aumento, resultando a los 7 días contenidos de N-NO_3^- de $118,4$ y $152,6 \text{ mg Kg}^{-1}$ para los suelos sin y con gallinazo respectivamente. A partir del día 10 y hasta el final de la incubación, las cantidades de N-NO_3^- en el suelo con ambos tratamientos presentaron una tendencia general al aumento, sin embargo presentaron oscilaciones en el tiempo entre $126,6$ y $273,8 \text{ mg Kg}^{-1}$. Estos valores de N-NO_3^- resultaron mucho mayores que los encontrados en los suelos degradado y de páramo al final de la incubación (Figs. 7B, 8B y 9B). Es de hacer notar que en varios de los muestreos los coeficientes de variación % de los valores medidos de N-NO_3^- resultaron relativamente altos (hasta un $25,3 \%$ de CV).

En cuanto al contenido de N mineral, en la figura 9C, se puede observar en los dos tratamientos una tendencia a disminuir desde el inicio de la incubación hasta los 14 días. Esta tendencia puede deberse a pérdidas de NH_4^+ por volatilización del NH_3 y/o a la inmovilización de NH_4^+ y NO_3^- por la microbiota del suelo. A partir de los 14 días se observa una tendencia a aumentar con las mismas oscilaciones que presentan los contenidos de N-NO_3^- indicados anteriormente, ya que en este periodo el N mineral está constituido mayoritariamente por NO_3^- ($> 96,4 \%$). Este aumento posiblemente se deba al proceso de mineralización del N orgánico contenido en el suelo.

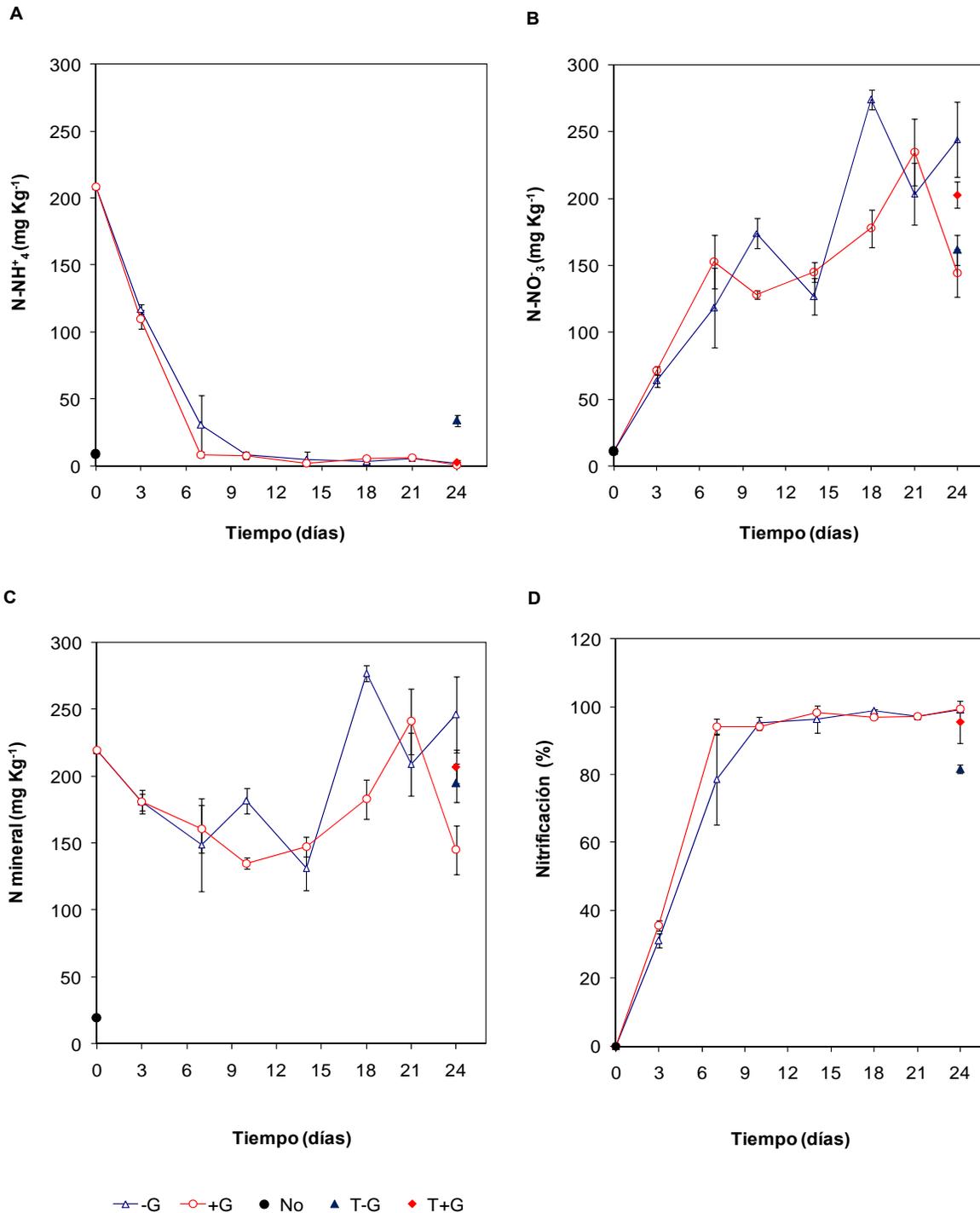


Figura 9. Curso con el tiempo (días) de incubación, de las cantidades de N en el suelo **agrícola** (mg Kg⁻¹) sin gallinazo (-G) y con gallinazo (+G). A. En forma de amonio (N-NH₄⁺). B. En forma de nitrato + nitrito (N-NO₃). C. Mineral y D. Porcentaje de N nitrificado (Nitrificación %). N₀ son las cantidades de N iniciales correspondientes. T-G y T+G son los valores determinados en suelos sin gallinazo (-G) y con gallinazo (+G) ambos con trampas de NaOH. Las barras representan los valores de la desviación normal (*n* = 4).

Respecto al porcentaje de nitrificación en el suelo agrícola (Fig. 9D) es notable el incremento durante los primeros 7 días de incubación. Los porcentajes encontrados en este lapso resultaron mayores para el suelo con gallinazo que sin gallinazo, alcanzando valores de 94,2% y 78,5 respectivamente. Ese incremento en el % de nitrificación se corresponde con el descenso en las cantidades de $N-NH_4^+$ y el aumento en las cantidades de $N-NO_3^-$ indicadas anteriormente. A los 24 días de la incubación dicho porcentaje alcanzó valores de 99,1 y 99,4 %. Por otra parte, se observa (Fig. 9D) que a los 24 días de incubación el porcentaje de nitrificación en los suelos con trampa de NaOH fue menor (T - G = 81,70 % y T + G = 95,48 %) que en los suelos sin trampa (-G = 99,06 % y +G = 99,41%).

6.2 Análisis estadístico de los resultados de la nitrificación

6.2.1 ANOVA con dos factores: tipo de suelo y gallinazo

El análisis de varianza con dos factores, tipo de suelo y gallinazo, para los resultados obtenidos del % de nitrificación a distintos tiempo de incubación (Tabla 4) indica que:

Tabla 4.

Resultados del análisis de varianza de dos factores, tipo de suelos y gallinazo, para el porcentaje de nitrificación a distintos tiempo de incubación para todos los suelos en estudio.

Niveles de significancia de ANOVA por factor			
Tiempo (días)	Tipo de Suelo	Gallinazo	Interacción
3	***	**	NS
7	***	NS	NS
10	***	***	NS
14	***	NS	NS
18	***	**	NS
21	***	***	**
24	***	*	***

*Nivel de Significancia P igual a *** P < 0,001; ** P < 0,01; * P < 0,05; NS P > 0,05*

- Existen diferencias altamente significativas ($P < 0,001$) en los porcentajes de nitrificación debido al tipo de suelo en todos los tiempos de incubación. Al obtener estos resultados, se realizó una prueba de comparación de medias entre los % de nitrificación de los distintos tipos de suelos, con y sin suministro de gallinazo por separado, y en cada uno de los tiempos de incubación evaluados. Encontrándose que el suelo agrícola presentó % de nitrificación significativamente mayores, seguido por el suelo degradado y resultando el suelo de páramo con % de nitrificación significativamente menores en todos los tiempos (Tabla 5).

Tabla 5.

Valores promedios de la nitrificación (%) sin y con suministro de gallinazo (-G y +G) para cada uno de los suelos, SP: Suelo de Páramo, SD: Suelo Degradado y SA: Suelo Agrícola, en los distintos tiempos de incubación. Los valores entre paréntesis corresponden a la desviación normal. Letras distintas indican diferencias significativas entre las medias de los % de nitrificación de los distintos tipos de suelo sin gallinazo y con gallinazo por separado ($n = 4$, Tukey B, $P < 0,01$).

Tiempo (días)	% Nitrificación					
	- G			+ G		
	SP	SD	SA	SP	SD	SA
3	0,00c (0,00)	0,73b (0,12)	31,14a (1,99)	0,00c (0,00)	1,04b (0,27)	35,63a (1,46)
7	1,24c (0,24)	2,18b (0,12)	78,54a (13,14)	1,38c (0,16)	2,62b (0,15)	94,23a (2,22)
10	1,31c (0,10)	3,88b (0,14)	95,32a (1,69)	1,44c (0,05)	4,58b (0,59)	94,23a (1,17)
14	1,88c (0,06)	5,30b (0,20)	96,33a (4,08)	2,09c (0,26)	6,23b (0,11)	98,35a (0,21)
18	2,44c (0,41)	7,49b (0,36)	98,74a (0,55)	3,14c (0,95)	11,01b (1,11)	96,99a (0,62)
21	3,00c (0,45)	8,33b (0,39)	97,14a (0,62)	3,76c (0,14)	12,26b (1,29)	97,20a (0,59)
24	3,65c (0,63)	9,17b (0,15)	99,06a (0,12)	3,13c (0,10)	14,31b (0,99)	99,41a (0,26)

- Existen diferencias significativas (Tabla 4) en los % de nitrificación debido al gallinazo a los 10 y 21 días ($P < 0,001$), a los 3 y 18 días ($P < 0,01$) y a los 24 días ($P < 0,05$). Mientras que a los 7 y 14 días no se observan diferencias significativas.

3. Para la interacción de los factores, tipo de suelo y gallinazo, el nivel de significancia obtenido (Tabla 4), indica que no existen diferencias significativas en los tiempos de incubación 3, 7, 10, 14 y 18, sin embargo a los 21 y 24 días se observan diferencias significativas ($P < 0,01$ y $P < 0,05$ respectivamente).

Los resultados anteriores sugieren que el efecto del gallinazo sobre el % de nitrificación durante la incubación, es diferente para los distintos tipos de suelo. Por esta razón se realizaron ANOVAS de dos vías, gallinazo y tiempo, para los % de nitrificación encontrados en cada tipo de suelo por separado.

6.2.2 ANOVA con dos factores: gallinazo y tiempo

El análisis de varianza con dos factores, gallinazo y tiempo de incubación, para los resultados obtenidos del % de nitrificación en cada uno de los tipos de suelo evaluados (Tabla 6), indica que:

1. En el suelo degradado existen diferencias altamente significativas ($P < 0,001$) en los % de nitrificación debido al gallinazo, mientras que en los suelos de páramo y agrícola el nivel de significación es menor ($P < 0,05$). Es de hacer notar que en los tres suelos, el suministro de gallinazo causa una tendencia al aumento de los % de nitrificación respecto a los suelos sin gallinazo (Figs. 7D, 8D y 9D).
2. En cada uno de los suelos analizados se encontraron diferencias altamente significativas ($P < 0,001$) en el % de nitrificación debidas al tiempo de incubación. En otras palabras en cada suelo se encontró una variación notable en los % de nitrificación durante el tiempo de incubación, con tendencia a aumentar en el tiempo (Figs. 7D, 8D y 9D).
3. Existen diferencias significativas en los % de nitrificación debido a la interacción de los factores, gallinazo y tiempo, para cada tipo de suelo pudiendo observarse en las figuras 7D, 8D y 9D, que se presentaron mayores % de nitrificación en los suelos con gallinazo a mayor tiempo de incubación.

Tabla 6.

Resultados de los análisis de varianza con dos factores, tratamiento y tiempo, para el % de nitrificación en cada tipo de suelo por separado. SP: Suelo de Páramo. SD: Suelo Degradado. SA: Suelo Agrícola.

Niveles de significancia de ANOVA por factor			
Tipo de Suelo	Gallinazo	Tiempo	Interacción
SP	*	***	*
SD	***	***	***
SA	*	***	***

*Nivel de Significancia P igual a *** $P < 0,001$; ** $P < 0,01$; * $P < 0,05$; NS $P > 0,05$*

Estos resultados indican que los tipos de suelo evaluados presentan dinámicas de nitrificación diferentes y que el suministro de gallinazo afecta estas dinámicas de manera distinta en los tres tipos de suelos, encontrándose como tendencia general un aumento en los % de nitrificación al aplicar el substrato (Figs. 7D, 8D, 9D y Tabla 5). En este sentido se encontró, que en el suelo degradado ocurrió el cambio más notable en la dinámica de nitrificación debido al suministro de gallinazo (Fig. 8D).

6.3 Resultados de la Respiración

Los resultados de la cantidad acumulada de C-CO₂ respirado de los suelos sin gallinazo (-G) y con gallinazo (+G) durante el periodo de tiempo transcurrido entre los muestreos y los valores acumulados se presentan a continuación para los distintos tipos de suelos.

6.3.1 Suelo de Páramo

En la figura 10A se observa que las cantidades de C-CO₂ liberadas del suelo de páramo en los distintos periodos de tiempo evaluados durante la incubación tienden a disminuir con el curso del tiempo. También se observa que del tratamiento con gallinazo se liberó mayor cantidad de C-CO₂ que del tratamiento sin gallinazo, en todos los periodos.

En la figura 10B se observa que las cantidades acumuladas de C-CO₂ liberado, siguen la tendencia de función exponencial de típica curvas de respiración edáfica (Paul y Clark, 1989, Sarmiento y Bottner, 2002; Machado, 2005). Se puede observar que el tratamiento con gallinazo presentó mayor cantidad acumulada de CO₂ respirado durante la incubación en relación al tratamiento sin gallinazo. La cantidad de C-CO₂ respirado a los 24 días de incubación fue de 839,5 mg Kg⁻¹ y 1116,5 mg Kg⁻¹ en los suelos sin y con gallinazo respectivamente.

Estos resultados indican, como era de esperarse, una mayor mineralización de C al suministrar un substrato orgánico como el gallinazo.

Para evaluar si la apertura semanal de los frascos permitía mantener las condiciones de aerobiosis y debido a que el suelo de páramo con gallinazo fue el que presentó mayor cantidad de C-CO₂ respirado durante los primeros siete días, respecto a todos los suelos con y sin gallinazo, se calculó la concentración promedio de O₂ remanente en los frascos de este suelo. Esta concentración resultó 12,5 %, la cual representa un valor mayor que el valor de 10 % señalado por Paul y Clark (1989) como concentración límite de aerobiosis. De estos resultados se concluye que la apertura de los frascos una vez por semana garantizó las condiciones aeróbicas en todos los suelos y tratamientos durante toda la incubación.

6.3.2 Suelo Degradado

En el suelo degradado (Fig. 11A) se observa, al igual que en el de páramo, que la cantidad de C-CO₂ liberada en los distintos periodos de tiempo evaluados, presenta una tendencia general a disminuir con el curso de la incubación para ambos tratamientos. También se observa que en el tratamiento con gallinazo se liberó mayor cantidad de C-CO₂ que en el tratamiento sin gallinazo, en todos los periodos.

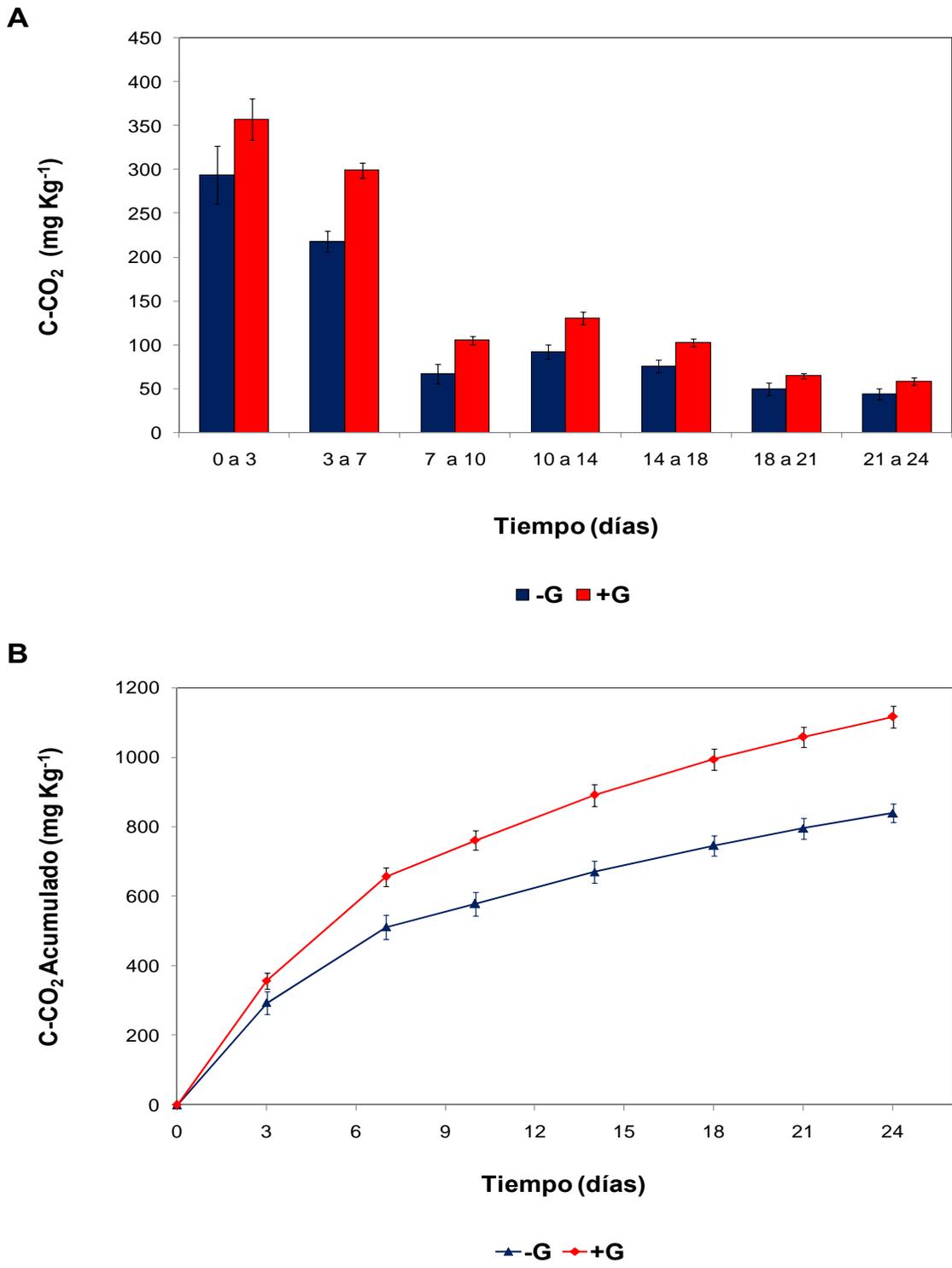


Figura 10. A. Cantidad de C-CO₂ liberado por respiración edáfica del suelo de páramo (mg Kg⁻¹) sin gallinazo (-G) y con gallinazo (+G) durante los periodos de tiempo transcurrido entre los muestreos. B. Curso de la cantidad acumulada de C-CO₂ (mg Kg⁻¹) liberada del suelo de páramo sin gallinazo (-G) y con gallinazo (+G) durante la incubación. Las barras representan los valores de la desviación normal ($n = 8$).

En cuanto a las cantidades de C-CO₂ acumuladas (Fig. 11B), se observa que siguen la misma tendencia típica de curvas de respiración similar a la obtenida en el suelo de páramo. Asimismo, el tratamiento con gallinazo exhibió mayores cantidades de C-CO₂ respiradas, acumuladas en el tiempo en relación al tratamiento sin gallinazo, encontrándose a los 24 días de incubación cantidades de 280,1 mg Kg⁻¹ y 610,4 mg Kg⁻¹ para los tratamientos sin y con gallinazo respectivamente. Es de hacer notar que estas cantidades resultaron mucho menores que en el suelo de páramo (Figs. 10B y 11B).

6.3.3 Suelo Agrícola

En el suelo agrícola (Fig. 12A) se encontraron las mismas tendencias que en los suelos de páramo y degradado en cuanto a la respiración. La cantidad de C-CO₂ respirada acumulada (Fig. 12B) a los 24 días de incubación en el suelo agrícola sin gallinazo fue 623,7 mg Kg⁻¹ resultando este valor intermedio entre el del suelo degradado (280,1 mg Kg⁻¹) y el del suelo de páramo (839,5 mg Kg⁻¹). Mientras que la cantidad de C-CO₂ respirada acumulada a los 24 días del suelo agrícola con gallinazo fue 814,5 mg Kg⁻¹ que también resultó intermedio entre la del suelo degradado (610,4 mg Kg⁻¹) y la del suelo de páramo (1116,5 mg Kg⁻¹) (Figs. 10B, 11B y 12B).

6.3.4 Mineralización del C del substrato gallinazo

En la figura 13 se muestran los valores de la mineralización acumulada del C del substrato gallinazo (Ec. 4) para los tres suelos. Se observa, que en el suelo degradado ocurrió una mayor mineralización del C del substrato gallinazo durante todo el transcurso de la incubación, en relación a los otros dos suelos. En el suelo agrícola, se encontró que el CO₂ proveniente de la mineralización del C del substrato gallinazo resultó mayor que en el suelo de páramo hasta el día 3, pero a partir del día 10 la tendencia se revierte. La mineralización acumulada del C del substrato gallinazo fue de 330,3 mg Kg⁻¹ en el suelo degradado; 277,0 mg Kg⁻¹ en el suelo de páramo y 190,9 mg Kg⁻¹ en el suelo agrícola (Fig. 13).

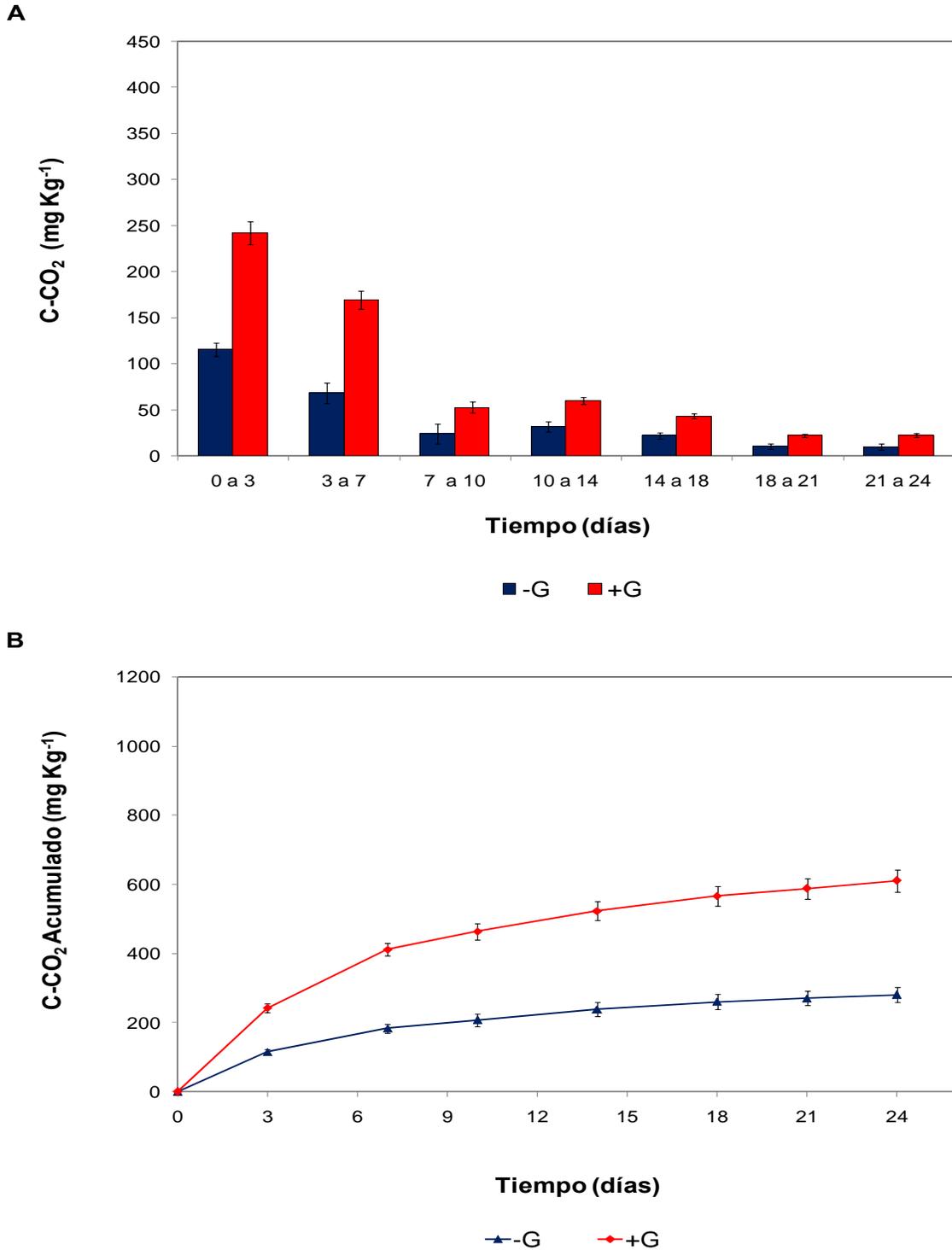
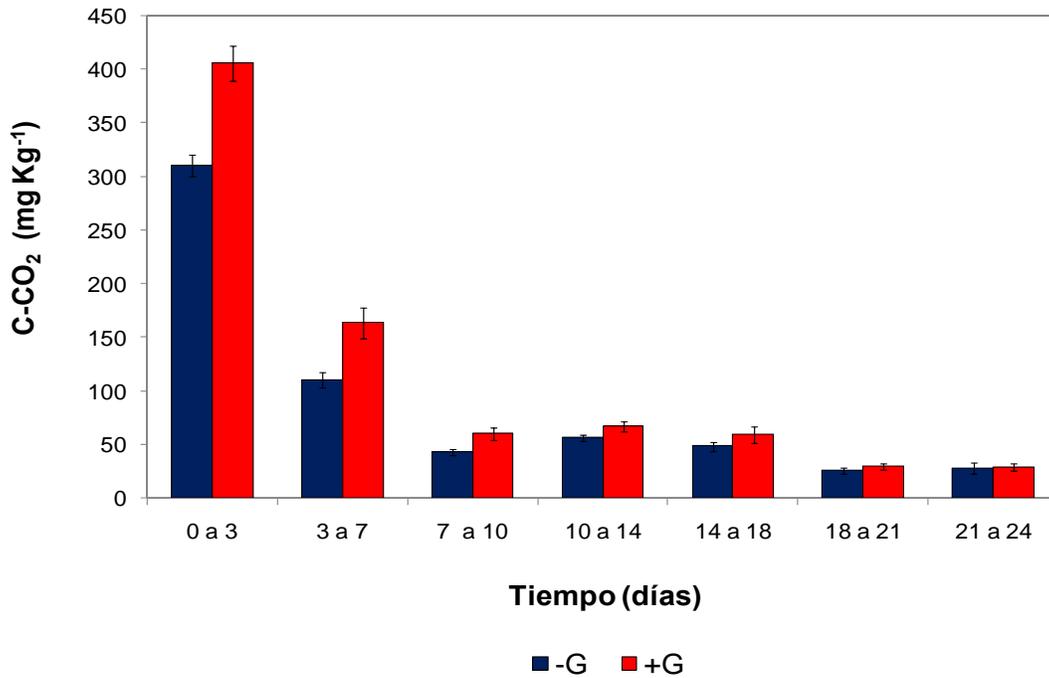


Figura 11. A. Cantidad de C-CO₂ liberado por respiración edáfica del suelo **degradado** (mg Kg⁻¹) sin gallinazo (-G) y con gallinazo (+G) durante los periodos de tiempo transcurrido entre los muestreos. B. Curso de la cantidad acumulada de C-CO₂ (mg Kg⁻¹) liberada del suelo degradado sin gallinazo (-G) y con gallinazo (+G) durante la incubación. Las barras representan los valores de la desviación normal ($n = 8$).

A



B

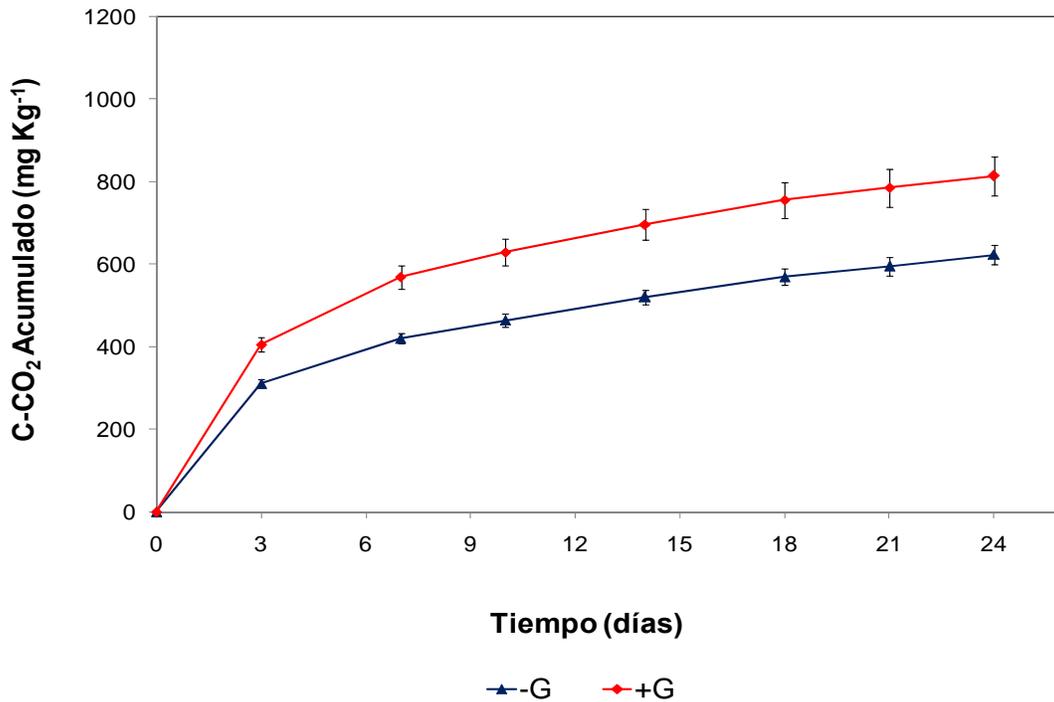


Figura 12. A. Cantidad de C-CO₂ liberado por respiración edáfica del suelo **agrícola** (mg Kg⁻¹) sin gallinazo (-G) y con gallinazo (+G) durante los periodos de tiempo transcurrido entre los muestreos. B. Curso de la cantidad acumulada de C-CO₂ (mg Kg⁻¹) liberada del suelo agrícola sin gallinazo (-G) y con gallinazo (+G) durante la incubación. Las barras representan los valores de la desviación normal ($n = 8$).

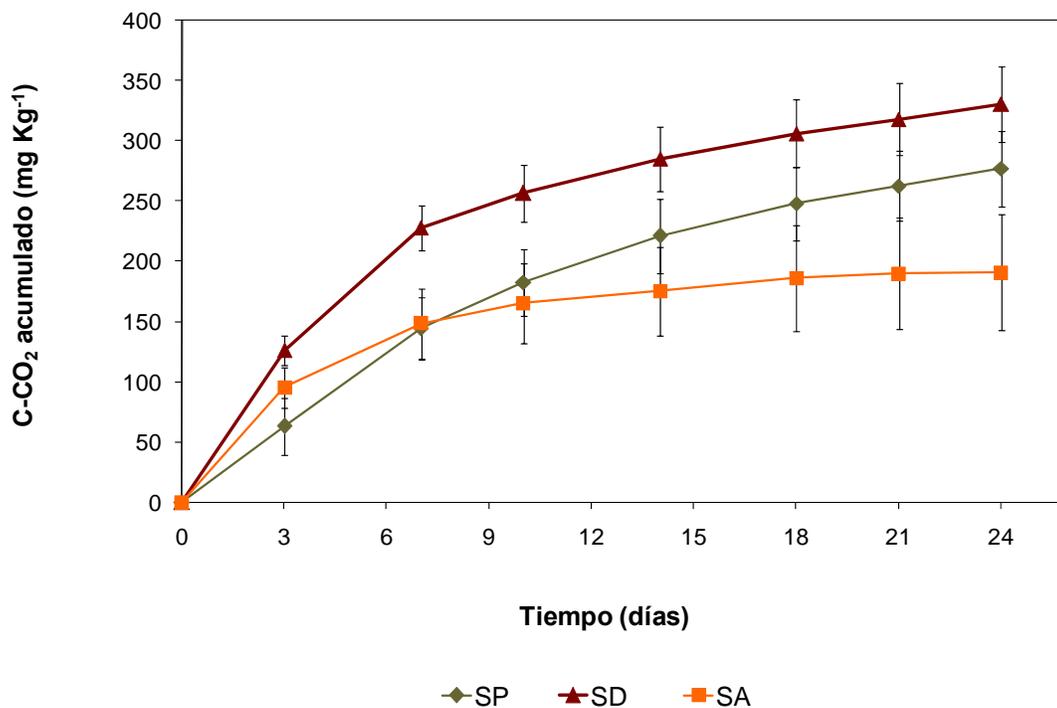


Figura 13. Curso de la cantidad acumulada de C-CO₂ (mg Kg⁻¹) mineralizada del substrato gallinazo durante la incubación, para los distintos tipos de suelo. SP: Suelo Páramo. SD: Suelo Degradado. SA: Suelo Agrícola. Las barras de error representan la desviación normal ($n = 8$).

6.4 Análisis estadístico de los resultados de la respiración edáfica

6.4.1 ANOVA con dos factores: tipo de suelo y gallinazo, para la respiración

6.4.1.1 Respiración por periodos de tiempo

El análisis de varianza con dos factores, tipo de suelo y gallinazo, para los resultados de la respiración edáfica medida en los distintos periodos de tiempo durante la incubación indica que (Tabla 7):

1. Existen diferencias altamente significativas ($P < 0,001$) en las cantidades de C-CO₂ liberada por respiración edáfica debido al tipo de suelo en todos los periodos de tiempo durante la incubación.

- Existen diferencias altamente significativas ($P < 0,001$) en las cantidades de C-CO₂ liberada por respiración edáfica debido al gallinazo en todos los periodos de tiempo durante la incubación. En las figuras 10A, 11A y 12A se puede observar como tendencia general que los suelos con gallinazo presentaron mayores cantidades de C-CO₂ respirado que los suelos sin gallinazo, en todos los tipos de suelo y en todos los periodos de tiempo evaluados.

Tabla 7.

Resultados del análisis de varianza de dos factores, tipo de suelo y gallinazo, para las cantidades de C-CO₂ respirados en los periodos de tiempo evaluados durante la incubación.

Nivel de significancia de ANOVA por factor			
Tiempo (días)	Tipo de Suelo	Gallinazo	Interacción
0 a 3	***	***	***
3 a 7	***	***	***
7 a 10	***	***	***
10 a 14	***	***	***
14 a 18	***	***	***
18 a 21	***	***	**
21 a 24	***	***	***

*Nivel de Significancia P igual a *** $P < 0,001$; ** $P < 0,01$; * $P < 0,05$; NS $P > 0,05$*

- El nivel de significancia hallado para la interacción de los factores, tipo de suelo y gallinazo, confirma que tanto el tipo de suelo como el suministro de gallinazo tienen un efecto determinante sobre la respiración edáfica medida en los distintos periodos de tiempo evaluados durante la incubación.

6.4.1.2 Respiración acumulada en el tiempo

El análisis de varianza con dos factores, tipo de suelo y gallinazo, para la respiración edáfica acumulada a distintos tiempo de incubación indica que (Tabla 8):

- Existen diferencias altamente significativas ($P < 0,001$) en las cantidades de C-CO₂ respiradas acumuladas debido al tipo de suelo, en todos los tiempos de incubación

evaluados. En las figuras 10B, 11B y 12B se puede notar que las cantidades de C-CO₂ respiradas acumuladas resultaron mayores para el suelo de páramo seguido por el suelo agrícola y menores para el suelo degradado.

2. También existen diferencias altamente significativas ($P < 0,001$) en las cantidades de C-CO₂ respiradas acumuladas, debido al factor gallinazo, en todos los tiempos de incubación. En las figuras 10B, 11B y 12B se puede apreciar como tendencia general que los tratamientos con gallinazo presentaron mayores cantidades de C-CO₂ respiradas acumuladas en el tiempo, que aquellos sin gallinazo.

Tabla 8.

Resultados del análisis de varianza de dos factores, tipo de suelo y gallinazo, para las cantidades de C-CO₂ respiradas acumuladas a distintos tiempo de incubación.

Nivel de significancia de ANOVA por factor			
Tiempo (días)	Tipo de Suelo	Gallinazo	Interacción
3	***	***	***
7	***	***	***
10	***	***	***
14	***	***	***
18	***	***	***
21	***	***	***
24	***	***	***

*Nivel de Significancia P igual a *** $P < 0,001$; ** $P < 0,01$; * $P < 0,05$; NS $P > 0,05$*

3. Existen diferencias altamente significativas ($P < 0,001$) en las cantidades de C-CO₂ respiradas acumuladas, debido a la interacción de los factores tipo de suelo y gallinazo en todos los tiempos de incubación analizados.

En vista de estos resultados se analizó en cada uno de los suelos el efecto del gallinazo sobre la respiración edáfica durante la incubación. Para ello se realizaron, para cada uno de los suelos ANOVAS de un factor, gallinazo, en cada uno de los periodos y tiempos de incubación considerados.

6.4.2 ANOVA de un factor: gallinazo, para la respiración

6.4.2.1 Respiración por periodos de tiempo

El análisis de varianza de un factor, gallinazo, para las cantidades de C-CO₂ respiradas en cada uno de los periodos de tiempo evaluado durante la incubación para cada uno de los tipos de suelo por separado indica que (Tabla 9):

1. En el suelo de páramo y en el suelo degradado existen diferencias altamente significativas ($P < 0,001$) en las cantidades de C-CO₂ debido al gallinazo en todos los periodos de tiempo evaluados durante la incubación (Fig. 10A y 11A).

Tabla 9.

Resultados del análisis de varianza de un factor, gallinazo, para la cantidad de C-CO₂ respirada en cada uno de los periodos de tiempo evaluados durante la incubación para cada uno de los tipos de suelo por separado. SP: Suelo de Páramo. SD: Suelo Degradado. SA: Suelo Agrícola.

Nivel de significancia de los ANOVAS para el factor gallinazo			
Tiempo (días)	Tipo de Suelo		
	SP	SD	SA
0 a 3	***	***	***
3 a 7	***	***	***
7 a 10	***	***	***
10 a 14	***	***	***
14 a 18	***	***	**
18 a 21	***	***	*
21 a 24	***	***	NS

*Nivel de Significancia P igual a *** $P < 0,001$; ** $P < 0,01$; * $P < 0,05$; NS $P > 0,05$*

2. En el suelo agrícola la cantidad de C-CO₂ respirada, presenta diferencias altamente significativas ($P < 0,001$) en los periodos 0 a 3, 3 a 7, 7 a 10, 10 a 14 días de incubación debido al gallinazo. Luego, en los periodos 14 a 18 y 18 a 21 días de incubación se presentan diferencias moderadamente significativas ($P < 0,01$ y $P < 0,05$ respectivamente) y al final de la incubación, 21 a 24 días la cantidad de C-CO₂ respirado no presentó diferencias significativas debido al gallinazo (Fig. 12A).

6.4.2.2 Respiración acumulada en el tiempo

Los resultados del análisis de varianza de un factor, gallinazo, para la cantidad de C-CO₂ respirada acumulada a distintos tiempos de incubación en cada uno de los tipos de suelo, indica que (Tabla 10): En los tres tipos de suelo analizados se encontraron diferencias altamente significativas ($P < 0,001$) en las cantidades de C-CO₂ respiradas acumuladas en todos los tiempos de incubación evaluados, debido al tratamiento con gallinazo. En las figuras 10B, 11B y 12B se pueden observar que para cada tipo de suelo, los tratamientos con gallinazo presentaron mayores cantidades de C-CO₂ respirado acumulado en el tiempo, que aquellos sin gallinazo durante toda la incubación.

Tabla 10.

Resultados del análisis de varianza de un factor, gallinazo, para las cantidades de C-CO₂ respiradas acumuladas en cada uno de los tiempo de incubación evaluados para cada uno de los tipos de suelo por separado. SP: Suelo de Páramo. SD: Suelo Degradado. SA: Suelo Agrícola.

Nivel de significancia de los ANOVAS para el factor gallinazo			
Tiempo (días)	Tipo de Suelo		
	SP	SD	SA
3	***	***	***
7	***	***	***
10	***	***	***
14	***	***	***
18	***	***	***
21	***	***	***
24	***	***	***

*Nivel de Significancia P igual a *** $P < 0,001$; ** $P < 0,01$; * $P < 0,05$; NS $P > 0,05$*

Estos resultados indican que la respiración de la microbiota es diferente en los suelos estudiados y que como era de esperarse el suministro de gallinazo causa un aumento en la respiración.

6.5. Análisis de los resultados de pH

El pH del gallinazo resultó $8,98 \pm 0,08$, lo cual indica que es alcalino. En la tabla 11 se presentan los valores promedios de los pH de los suelos sin gallinazo y con gallinazo. La prueba de comparación (Tukey B) entre estos valores promedio ($n = 3$) del pH de los

distintos tipos de suelos, sin y con gallinazo por separado y el análisis de varianza de un factor, gallinazo, para los valores de pH obtenidos en los distintos tipos de suelos por separado (Tabla 11) indica que:

1. Al comparar las medias de todos los pH de los suelos sin gallinazo ($pH_{\text{suelos - G}}$) y con gallinazo ($pH_{\text{suelos + G}}$) por separado se observa que, el suelo agrícola presentó un valor de pH significativamente mayor (cercano a la neutralidad), seguido por el suelo degradado (con pH intermedio) y por último el suelo de páramo con pH significativamente menor (ácido). Podemos observar también que estos valores de pH en los suelos sin gallinazo presentaron valores similares a los pH determinados por Felicien (2008) (Tabla 1).
2. Los pH analizados en cada uno de los suelos registraron un ligero aumento debido al suministro de gallinazo, sin embargo el análisis de varianza sobre el pH de cada suelo, por separado, indica diferencias moderadamente significativas ($P < 0,01$) sólo para el suelo de páramo, mientras que los suelos degradado y agrícola no presentaron diferencias significativas, debido al factor gallinazo.

Tabla 11

Medias de los pH (1:5 suelo en agua) de los suelos estudiados, sin y con suministro de gallinazo. Los valores entre paréntesis corresponden a la desviación normal. Letras distintas indican diferencias significativas entre las medias de los pH de los distintos tipos de suelos sin y con gallinazo por separado ($n = 3$, Tukey B, $P < 0,01$). Análisis de varianza del factor gallinazo sobre el pH de los suelos, SP: Suelo de Páramo, SD: Suelo Degradado y SA: Suelo Agrícola, por separado.

Tipo de Suelos	Medidas de pH		Nivel de significancia de ANOVA para el factor
	$pH_{\text{suelos - G}}$	$pH_{\text{suelos + G}}$	Gallinazo
SP	5,10c (0,01)	5,19c (0,02)	**
SD	6,04b (0,14)	6,10b (0,12)	NS
SA	7,19a (0,16)	7,28a (0,09)	NS

*Nivel de Significancia P igual a *** $P < 0,001$; ** $P < 0,01$; * $P < 0,05$; NS $P > 0,05$*

En la tabla 12 se presentan los resultados del análisis de varianza de dos factores, tipo de suelo y gallinazo, sobre los pH de los suelos, los cuales indican:

1. Existen diferencias altamente significativas ($P < 0,001$) en el pH debido al factor tipo de suelo.
2. No existen diferencias significativas en los valores de pH debido al factor gallinazo.
3. No existen diferencias significativas en el pH debido a la interacción de los factores tipo de suelo y gallinazo.

Tabla 12.
Análisis de varianza de dos factores, gallinazo y tipo de suelo, sobre el pH de los suelos estudiados.

Parámetro	Niveles de significancia de ANOVA por factor		
	Tipo de suelo	Gallinazo	Interacción
pH	***	NS	NS

*Nivel de Significancia P igual a *** $P < 0,001$; ** $P < 0,01$; * $P < 0,05$; NS $P > 0,05$*

Todos estos resultados permiten concluir que los suelos analizados presentan pH significativamente diferentes y el suministro de gallinazo en la dosis utilizada no modificó significativamente el pH de estos suelos.

6.6 Relación entre nitrificación y respiración edáfica

6.6.1 Efecto de las trampas de NaOH sobre la nitrificación

Como se mencionó en los métodos, los frascos con trampas se pueden considerar como deficitarios en CO_2 en comparación con los frascos sin trampa, los cuales tendrían una concentración de CO_2 mayor que la de la atmósfera. Por lo tanto los suelos con trampa se identificaron como, $-\text{CO}_2$ y los suelos sin trampa como $+\text{CO}_2$. Por otra parte los resultados encontrados, demuestran que el suministro de gallinazo causó aumento en la respiración edáfica y por lo tanto, mayor concentración de CO_2 en relación a los suelos sin

gallinazo; por esta razón los suelos con gallinazo se identificaron como, +CO₂, y los suelos sin gallinazo como, -CO₂.

En la tabla 13 se muestran los promedios del porcentaje de nitrificación a los 24 días de incubación para los distintos suelos con y sin gallinazo y con y sin trampa de NaOH, así como los resultados de los análisis de varianza con dos factores (gallinazo y trampa) realizados para cada suelo por separado. Se puede observar que:

1. Se observan diferencias significativas en el % de nitrificación debido a las trampas, en los tres tipos de suelo, resultando el % de nitrificación menor en los suelos con trampas (-CO₂) que en los suelos sin trampas (+CO₂), al comparar los suelos sin gallinazo y con gallinazo por separado.
2. Existen diferencias altamente significativas en el % de nitrificación de los suelos degradado y agrícola debido al gallinazo, resultando el % de nitrificación mayor en los tratamientos con gallinazo (+CO₂) que en los tratamientos sin gallinazo (-CO₂) al comparar los suelos sin trampa y con trampa por separado. En el caso del suelo de páramo no se encontraron diferencias significativas debido al gallinazo, porque si bien en el suelo con trampa con gallinazo se encontró mayor % de nitrificación que en el suelo con trampa sin gallinazo, en cambio en el suelo sin trampa con gallinazo el % de nitrificación, resultó menor que en el suelo sin trampa sin gallinazo.
3. Existen diferencias significativas en el % de nitrificación en cada uno de los tres suelos debido a la interacción de los factores gallinazo y trampa, resultando como tendencia general para cada tipo de suelo, que los suelos sin trampa y con gallinazo (+CO₂ +CO₂) presentan los mayores % de nitrificación, seguidos por los suelos sin trampa y sin gallinazo (+CO₂ -CO₂), luego los suelos con trampa y con gallinazo (-CO₂ +CO₂) y resultando los % de nitrificación menores en los suelos con trampa y sin gallinazo (-CO₂ -CO₂). En este sentido, en el suelo degradado fue donde se presentaron las diferencias más notables y altamente significativas en los % de nitrificación, al considerar de manera conjunta los factores trampa de NaOH y gallinazo.

Tabla 13.

Valores promedio de la nitrificación (%) con y sin suministro de gallinazo (+G y -G), con y sin trampa de NaOH (+T y -T) a los 24 días de incubación y resultados de los análisis de varianza de dos factores (gallinazo y trampa de NaOH) para los % nitrificación en los distintos suelos por separado. SP: Suelo de Páramo. SD: Suelo Degradado. SA: Suelo Agrícola. Los valores entre paréntesis corresponden a la desviación normal. Letras distintas indican diferencias significativas entre las medias de los tratamientos con y sin trampa, con y sin gallinazo en cada tipo de suelo ($n = 4$, Tukey B, $P < 0,01$).

Tipo de Suelo	% Nitrificación				Nivel de Significancia de ANOVA por factor		
	- G		+G		Gallinazo	Trampa	Interacción
	-T	+T	-T	+T			
SP	3,65 a (0,63)	2,74 b (0,10)	3,14 ab (0,10)	3,05 ab (0,07)	NS	**	*
SD	9,17 b (0,15)	4,20 d (0,14)	14,31 a (0,99)	6,16 c (0,67)	***	***	***
SA	99,06 a (0,12)	81,70 b (1,23)	99,41 a (0,26)	95,48 a (6,32)	***	***	**

*Nivel de Significancia P igual a *** $P < 0,001$; ** $P < 0,01$; * $P < 0,05$; NS $P > 0,05$*

El resultado de este análisis indica que la concentración de CO₂ en la atmósfera del suelo es un factor determinante para el proceso de nitrificación, encontrándose como tendencia general que ocurre mayor nitrificación a mayor concentración de CO₂.

6.6.2 Relación entre el % de nitrificación y las cantidades de C-CO₂ respiradas

A los fines de probar si existe relación matemática entre el % de nitrificación y la cantidad de CO₂ respirada se graficó:

1. El % de nitrificación obtenido a los distintos tiempos de incubación en relación a las cantidades acumuladas de C-CO₂ respirado, correspondientes a esos mismos tiempos, de todos los suelos con y sin gallinazo (Fig. 14). Se puede observar que la correlación obtenida entre las dos variables es muy baja y no significativa, cuando se considera el modelo lineal.

2. La diferencia (Δ) en el % de nitrificación de los tratamientos con y sin gallinazo en relación a las diferencias (Δ) en las cantidades acumuladas de C-CO₂ respiradas en los tratamientos con y sin gallinazo correspondientes, en todos los tiempos de incubación (Figs. 15).

Donde:

$$\Delta \% \text{ Nitrificación} = \% \text{ Nitrif. trat con gallinazo } t_n - \% \text{ Nitrif. trat. sin gallinazo } t_n \quad (\text{Ec. 5})$$

$$\Delta \text{ mg C-CO}_2 = \text{mg C-CO}_2 \text{ Kg}^{-1} \text{ acum. trat. con gallinazo } t_n - \text{mg C-CO}_2 \text{ Kg}^{-1} \text{ acum. (Ec. 6)} \\ \text{trat. sin gallinazo } t_n$$

En vista de que se puede observar que el suelo agrícola presenta valores que difieren de los otros suelos, se procedió a graficar los tres suelos por separados y los suelos de páramo y degradado juntos.

En las figuras 16A, 16B, 16C y 17 se puede observar que en todos los casos los valores se ajustan con coeficientes de regresión mayores que 0,77 a funciones exponenciales del tipo:

$$y = ae^{bx} \quad (\text{Ec. 7})$$

Donde:

$$y = \Delta \% \text{ Nitrificación}$$

$$X = \Delta \text{ mg C-CO}_2 \text{ Kg}^{-1} \text{ acumulado}$$

$$e = \text{Exponencial}$$

$$a = \text{Constante}$$

$$b = \text{Constante}$$

Es de hacer notar que en la figura 16C para el suelo agrícola se presenta la curva de ajuste a una función exponencial realizada solamente con dos puntos, debido a que a partir de los 10 días de incubación en este suelo los $\Delta\%$ de nitrificación resultaron aproximadamente cero, ya que los valores del % de nitrificación fueron mayores que 94%. Aunque una curva ajustada a sólo 2 puntos experimentales evidentemente tiene un $R^2 = 1$; sin embargo en la figura 16C se presenta la ecuación de regresión exponencial con el objeto de tener idea aproximada de los valores que pudieran tener los coeficientes para este suelo.

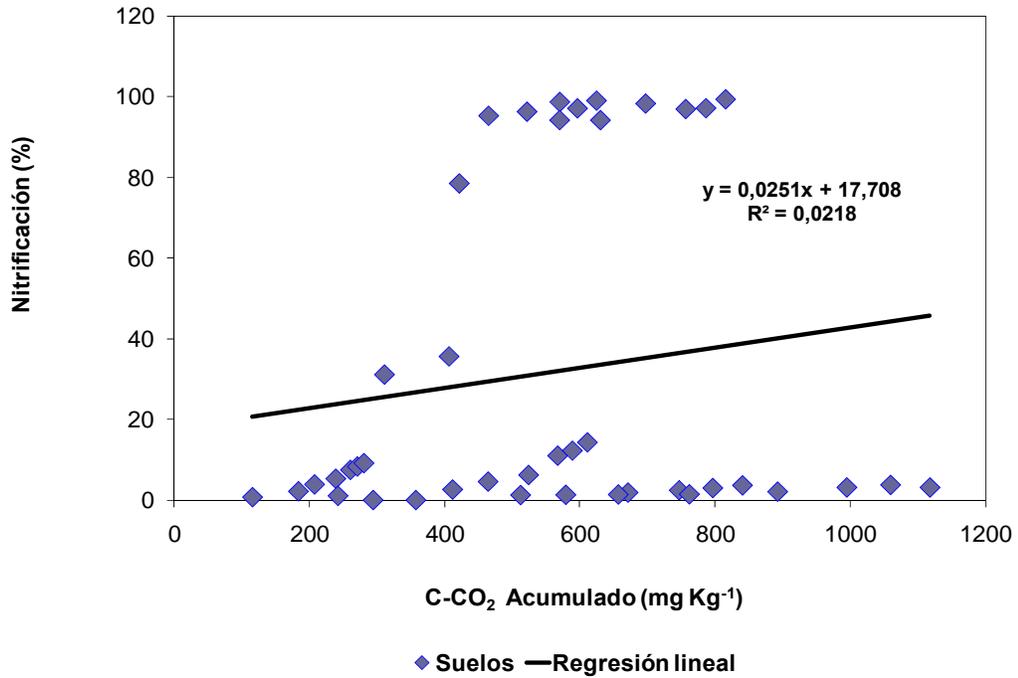


Figura 14. Correlación entre el % de nitrificación y la cantidad de C-CO₂ respirado acumulado para todo el conjunto de valores de los distintos suelos con y sin suministro de gallinazo, con su respectiva regresión lineal y valor de R².

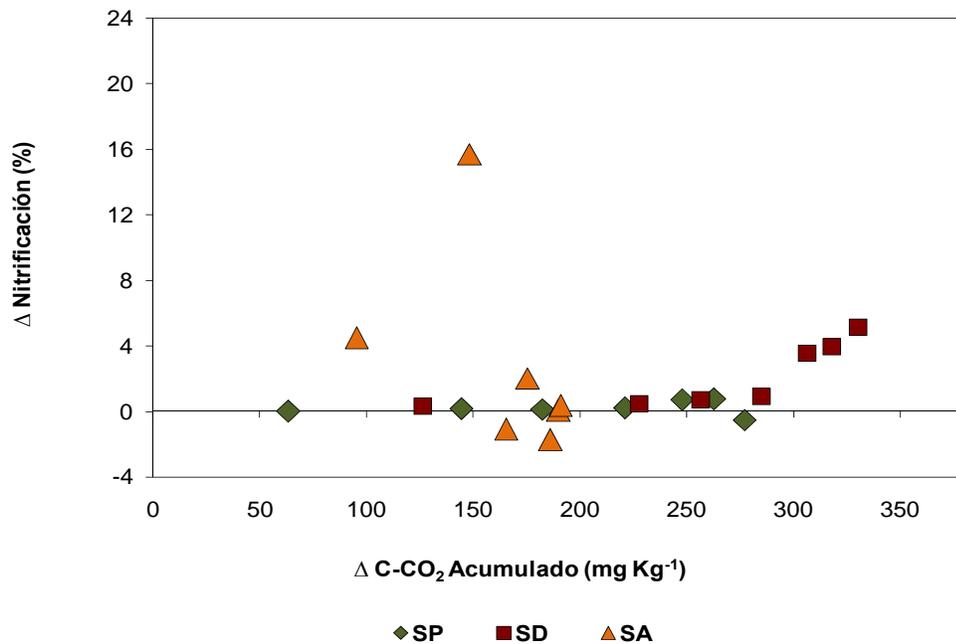


Figura 15. Δ% Nitrificación en relación al Δ mg C-CO₂ en todos los tiempos de incubación para todos los suelos: SP: Suelo de Páramo, SD: Suelo Degradado, SA: Suelo Agrícola.

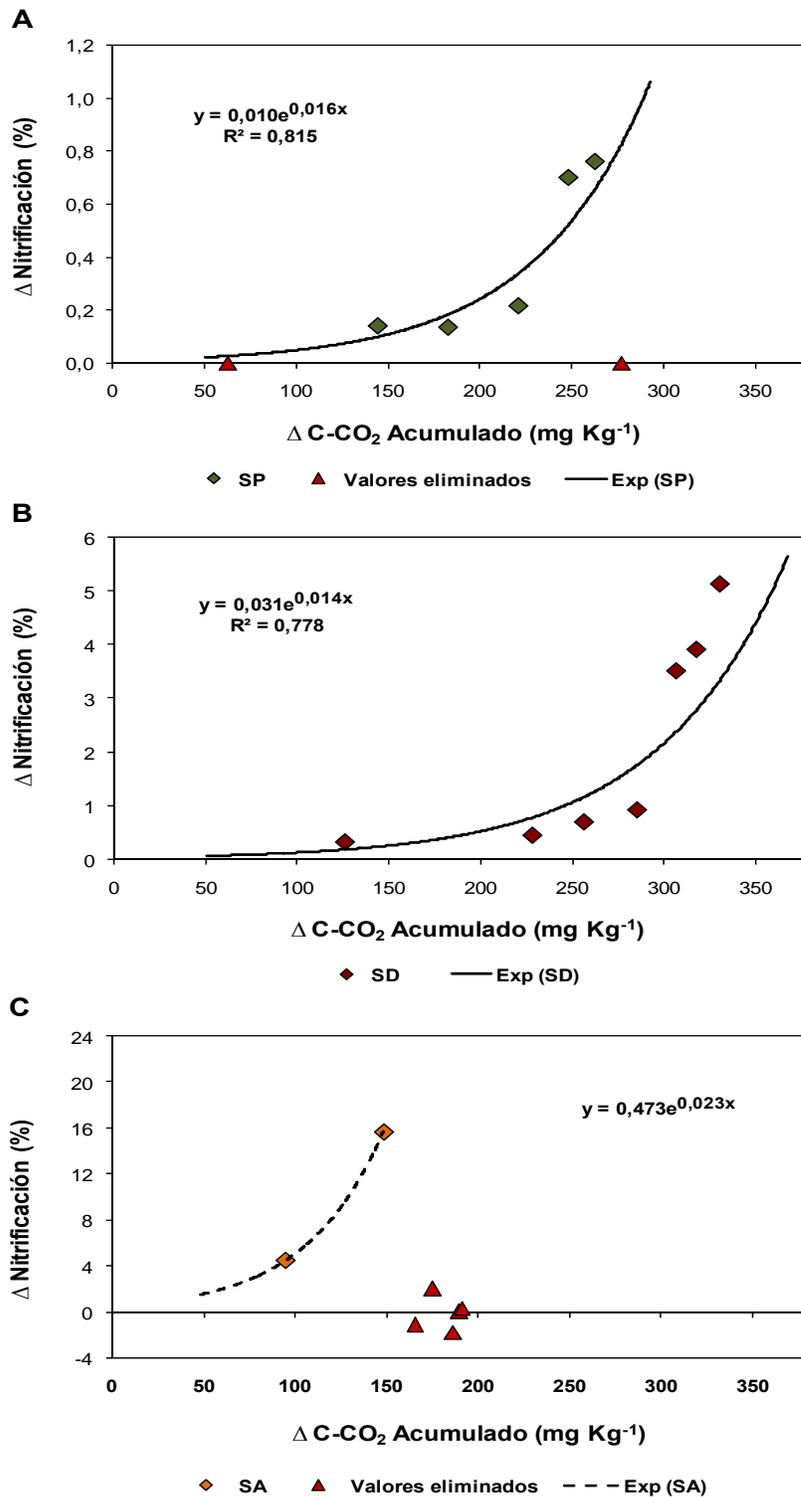


Figura 16. Regresión exponencial entre el $\Delta\%$ Nitrificación en relación al Δ mg C-CO₂ en todos los tiempo de incubación con su respectivo valor de R^2 . A. Suelo de Páramo. B. Suelo Degradado. C. Suelo Agrícola. Los puntos ▲ no fueron considerados para el ajuste de la función exponencial, en el caso del suelo de páramo debido al Δ % de nitrificación ≤ 0 y en el caso del suelo agrícola debido a que los % nitrificación para esos puntos resultaron $> 94\%$.

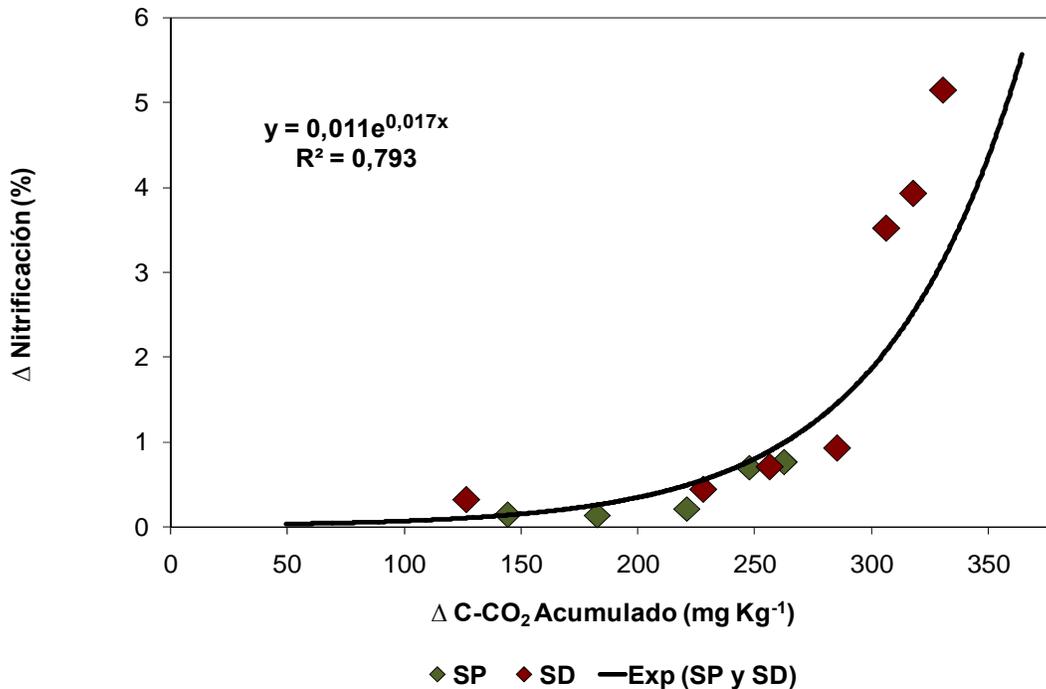


Figura 17. Regresión exponencial entre el $\Delta\%$ Nitrificación en relación al Δ mg C-CO₂ en todos los tiempos de incubación con su respectivo valor de R², para los suelos de páramo (SP) y degradado (SD).

Los gráficos anteriores (Fig. 16A, 16B, 16C y 17) demuestran que el incremento causado por el gallinazo sobre la nitrificación, se relaciona con el aumento en la respiración edáfica debido al suministro de gallinazo, a través de funciones exponenciales del tipo $y = ae^{bx}$ que presentan altos coeficientes de regresión ($R^2 > 0,77$).

6.7 Resumen del análisis de resultados

- La dinámica de la nitrificación y la dinámica de la respiración resultaron diferentes para los distintos tipos de suelos incubados.
- El suministro de gallinazo estimuló la respiración en todos los suelos estudiados.

- El suministro de gallinazo estimuló la nitrificación en los suelos estudiados especialmente en el suelo degradado donde las diferencias entre los tratamientos con o sin gallinazo resultaron más acentuadas.
- La presencia de las trampas de NaOH que capturan el CO₂ liberado causó una disminución del % de nitrificación al final de la incubación en todos los suelos sin gallinazo y en menor proporción en los suelos con gallinazo.
- El suministro de gallinazo en la dosis empleada no modificó significativamente el pH de los suelos estudiados.
- El incremento de la nitrificación en los tratamientos con gallinazo se puede atribuir en gran medida (>77%) al aumento de la respiración edáfica debida al suministro de gallinazo, tal como lo explica el modelo exponencial.

7. Discusión

7.1 Comprobación de las hipótesis

7.1.1 Hipótesis I

“El gallinazo podría favorecer el proceso de nitrificación porque promueve la producción de CO₂ por parte de los microorganismos heterótrofos del suelo, siendo este CO₂ utilizado por los microorganismos nitrificantes (quimioautótrofos) como fuente de C para incorporarlo a su biomasa”.

Los resultados encontrados en el presente trabajo y los análisis estadísticos realizados, indican que el suministro de gallinazo estimuló la nitrificación en los suelos estudiados (Figs. 7D, 8D, 9D y Tablas 4, 5 y 6) y también causó un aumento en la respiración edáfica, es decir en la liberación de CO₂ (Figs. 10, 11, 12 y Tablas 7, 8, 9 y 10). En vista de esto, para probar la hipótesis I, se trató de evaluar si este incremento en la nitrificación causado por el suministro de gallinazo, fue debido al aumento en la liberación de CO₂.

En este sentido, por una parte, se analizó el efecto de las trampas de NaOH sobre la nitrificación, a los 24 días de incubación para cada uno de los tipos de suelo bajo los tratamientos con y sin suministro de gallinazo (Tabla 13):

Se encontró que en los suelos estudiados, sin suministro de gallinazo, la presencia de las trampas de NaOH, que capturan el CO₂, causó una disminución considerable en el % de nitrificación. La disminución relativa en el % de nitrificación fue de 54,2% en el suelo degradado, seguido por 24,9% en el suelo de páramo y 17,5% en el suelo agrícola. Estos resultados están de acuerdo con lo encontrado por Kinsbursky y Saltzman (1990) en experimentos de incubación de suelos en envases cerrados durante 7 días, realizados en condiciones de laboratorio, quienes informan que el % de nitrificación en los envases control (sin trampa de NaOH) resultó de 80% mientras que en los envases con trampas de NaOH, con concentración de 50 mM y 500 mM, el % de nitrificación disminuyó por debajo de 30%. Además, en los frascos control midieron una concentración promedio de 12,6 ml

$\text{CO}_2 \text{ L}^{-1}$ aire, mientras que en los frascos con trampas de NaOH (50 mM y 500 mM) resultó 0,1 ml $\text{CO}_2 \text{ L}^{-1}$ aire. También encontraron una considerable reducción en el número de colonias oxidadoras de NH_4^+ en los envases con trampa a los 4 días de incubación, concluyendo que cuando la concentración de CO_2 se mantuvo por debajo de 0,1 ml $\text{CO}_2 \text{ L}^{-1}$ aire, por efecto de las trampas, el crecimiento de la población de oxidadores de NH_4^+ y la nitrificación se redujeron, confirmando la importancia del CO_2 en el proceso de nitrificación. También Azam et al. (2005) encontraron que en muestras de suelo incubadas durante 20 días utilizando envases no herméticos con trampas de NaOH para la captura de CO_2 , la nitrificación se redujo entre 8 y 62% en diferentes tiempos de incubación (un promedio de 28,8%) respecto a los suelos sin trampas. Mientras que la concentración de CO_2 en los envases con trampa disminuyó en promedio 96% respecto a la de los envases sin trampa; en estos últimos aumentó entre 62 y 140% en relación a la concentración en la atmósfera (358 ppm). A su vez Azam et al. (2004) informan que durante 20 días de incubación en los suelos con trampas se redujo la nitrificación respecto a los suelos sin trampas.

Los resultados en el presente trabajo también muestran que en todos los suelos con suministro de gallinazo, la presencia de las trampas de NaOH causó disminución en el % de nitrificación. Esta disminución fue de 57,0% en el suelo degradado, mientras que en el suelo agrícola fue del 4,0% y en el suelo de páramo 2,8%.

Todos estos resultados demuestran que la nitrificación es limitada cuando la concentración de CO_2 disminuye por la presencia de trampas de NaOH.

También se puede observar, en todos los suelos con trampas de NaOH, que el suministro de gallinazo produjo, al final de la incubación un aumento en el % de nitrificación respecto a los suelos sin gallinazo. Este aumento en la nitrificación fue de 46,7% en el suelo degradado, 16,9% en el suelo agrícola y 11,31% en el suelo de páramo, como consecuencia del suministro de gallinazo a pesar de la presencia de las trampas alcalinas. En otras palabras el gallinazo atenúa el efecto de la trampa. De manera similar Azam et al. (2004), incubaron muestras de suelo con y sin suministro de paja de trigo y en presencia de trampas de NaOH, encontrando que el suministro de paja de trigo también

causó incremento en el % de nitrificación de los suelos. Estos autores atribuyen este aumento en la nitrificación al aumento en la concentración de CO₂ por la descomposición del substrato orgánico. Sin embargo no observaron aumento significativo en los % de nitrificación cuando suministraron paja de trigo en ausencia de trampas de NaOH, lo cual difiere de lo encontrado en el presente trabajo, donde el suministro de gallinazo en ausencia de trampas, si produjo un aumento en el % de nitrificación durante el curso de la incubación (Figs. 7D, 8D, 9D y Tabla 4, 5 y 6). El hecho de que el gallinazo sea un substrato que se descompone más rápido que la paja de trigo produciendo importantes cantidades de CO₂, explicaría estos resultados diferentes y sería un argumento a favor de la hipótesis planteada.

Además, el análisis realizado para evaluar la interacción de los factores trampa de NaOH y gallinazo sobre los resultados del % de nitrificación a los 24 días (Tabla 13), indica que ocurre mayor nitrificación cuando la concentración de CO₂ tiende a ser mayor, demostrando que la nitrificación depende de la disponibilidad de CO₂.

Por otra parte, los resultados obtenidos no solamente muestran como tendencia que el suministro de gallinazo promueve mayor respiración y nitrificación, sino que además el incremento en la respiración edáfica causada por el suministro de gallinazo explica, a través de un modelo exponencial, más del 77% del aumento ocurrido en la nitrificación cuando se suministró este substrato (Figs. 16A, 16B, 16C y 17).

Dado que el CO₂ constituye la principal fuente de C para el crecimiento de las bacterias oxidadoras de NH₄⁺ (Kinsbursky y Saltzman, 1990; Paul y Clark, 1989), entonces los resultados encontrados en el presente trabajo indican que la liberación de CO₂ debida a la mineralización del gallinazo por parte de la microbiota es un factor determinante que promueve el proceso de nitrificación, cuando se suministra este substrato.

Sin embargo se podría pensar que el aumento en la nitrificación causado por el gallinazo se deba también a otros factores diferentes del aumento en la disponibilidad de C, tales como:

- a. El aumento en la concentración de NH_4^+ en el suelo, debido a la amonificación del N orgánico contenido en el gallinazo, podría estimular la nitrificación por aumento en la disponibilidad del sustrato. Es decir, podría estar ocurriendo algo similar a lo encontrado por Cookson et al. (2002) que informan que los contenidos de NO_3^- aumentaron con la incorporación de abono verde de trébol, debido a la baja relación C/N de este sustrato, que favorece la mineralización del N en forma de NH_4^+ y la subsiguiente nitrificación. Sin embargo, esto no parece ocurrir en este experimento porque, en primer lugar; no se observa un aumento en el contenido de N mineral en los suelos con gallinazo en relación a aquellos sin gallinazo (Figs. 7C, 8C y 9C) y en segundo lugar, la ecuación de Kandeler (Ec. 3) considera el efecto de la mineralización a través del factor de corrección introducido en el denominador ($N_{\text{min } t_n} - N_{\text{min } t_0}$).
- b. Cambios en el pH de los suelos, por el suministro del gallinazo podrían mejorar las condiciones para la actividad nitrificante que es altamente sensible a este factor. Sin embargo, estos cambios no fueron significativos (Tablas 11 y 12) excepto en el suelo de páramo en el cual se observa un leve aumento aunque moderadamente significativo ($P < 0,01$) del pH (Tabla 11). Estos resultados indican que para la dosis de gallinazo utilizada, el cambio de pH no parece ser un factor determinante del aumento de la nitrificación ocurrida.

En conclusión los resultados obtenidos indican que en las condiciones experimentales de este trabajo, el gallinazo estimuló la nitrificación porque promovió la producción de CO_2 por parte de los microorganismos heterótrofos del suelo, lo cual confirma la hipótesis I.

7.1.2 Hipótesis II

“Dado que el proceso de nitrificación depende de las propiedades físico-químicas de los suelos, tales como: pH, textura, MOS y contenido de nutrientes; se espera que el porcentaje de nitrificación y la respuesta al gallinazo sean distintos en suelos con características físico-químicas diferentes”.

Los resultados obtenidos muestran que la dinámica de la nitrificación resultó diferente en los tres suelos estudiados. Esto se evidencia al observar: Primero, que en todos los tiempos estudiados durante la incubación se encontraron diferencias significativas en el % de nitrificación entre los tres suelos, resultando siempre el mismo orden: suelo agrícola > suelo degradado > suelo de páramo (Tabla 5). Segundo, si bien en el caso de los suelos degradado y de páramo el % de nitrificación aumentó con una tendencia lineal durante toda la incubación, hasta los 24 días en que alcanzaron valores de 3,7% en el suelo de páramo y 9,2% en el suelo degradado ambos sin gallinazo (Figs. 7D y 8D). En cambio en el suelo agrícola la nitrificación resultó 95,3% a los 10 días de la incubación y 99,1% a los 24 días (Fig. 9D), lo cual sugiere un alto potencial de nitrificación en este suelo en comparación a los otros suelos.

Estos resultados demuestran que los tres suelos tienen potenciales de nitrificación diferentes, destacándose el suelo agrícola por su alto potencial.

Con el objeto de tratar de entender las posibles causas de estas diferencias, a continuación se realiza un análisis basado en algunas características físico-químicas de los tres suelos estudiados.

Materia orgánica del suelo (MOS). La MOS puede favorecer la nitrificación porque la mineralización de ésta por parte de la microbiota heterótrofa del suelo produce NH_4^+ y CO_2 que son los substratos que requieren los nitrificantes.

En el caso del suelo de páramo, se observó mayor amonificación (Fig. 7A), y mayor cantidad de C- CO_2 liberada durante la incubación (Fig. 10A y 10B) en comparación a los otros suelos (Figs. 8A, 9A, 11A, 11B, 12A y 12B), que se corresponde con mayor contenido inicial de N y carbono orgánico (Tabla1). Sin embargo el contenido de NO_3^-

apenas alcanzó 12,0 mg N-NO₃⁻ a los 24 días, y la nitrificación calculada fue menor al 4% al final de la incubación. Estos resultados indican un bajo potencial de nitrificación que se corresponde con un mayor contenido inicial N-NH₄⁺ (23,7 mg Kg⁻¹) producto de la amonificación de la MOS, el cual no es nitrificado.

En el suelo degradado no se observa un proceso de amonificación neta (Fig. 8A) y la respiración edáfica (Fig. 11A y 11B) es menor en relación al suelo de páramo (Figs. 10A, 10B, 12A y 12B) que se corresponden con menores contenidos de N total y carbono orgánico (Tabla 1). Sin embargo los contenidos de NO₃⁻ y la nitrificación resultaron mayores que los encontrados en el suelo de páramo.

En relación al suelo agrícola, durante los primeros 10 días de la incubación, el NH₄⁺ añadido, nitrificó prácticamente todo (Figs. 9A y 9D). Entre 14 y 24 días se observa una tendencia al aumento del contenido de N mineral, el cual está constituido principalmente por NO₃⁻ (más del 96,4%). Estos resultados indican que posiblemente en esta etapa de la incubación ocurrió amonificación del N orgánico del suelo, sin embargo el NH₄⁺ producido nitrificó rápidamente, lo cual evidencia que el suelo agrícola tiene un alto potencial de nitrificación. Este suelo presenta contenidos de N total y carbono orgánico intermedios entre los valores de los otros dos suelos (Tabla 1), que se corresponden con procesos de amonificación y respiración de magnitud también intermedia; sin embargo los % de nitrificación resultaron mucho mayores que los de los otros suelos (Tabla 5).

De este análisis se puede concluir que para estos suelos, el contenido de MOS no parece ser el factor que determina las diferencias en los % de nitrificación encontrados.

Textura. El contenido de arcillas y de materia orgánica influye de manera directa sobre la capacidad de retención de agua y la capacidad de intercambio catiónico del suelo (Casanova, 2005). Estas propiedades pueden afectar el proceso de nitrificación, ya que la capacidad de retención de agua afecta la humedad, mientras que la CIC influye sobre la disponibilidad de NH₄⁺ para los microorganismos. En los suelos estudiados, se puede observar (Tabla 1) que los valores de capacidad de campo, punto de marchitez permanente y CIC presentan el mismo orden de valores del contenido de carbono orgánico, SP > SA >

SD y no de los valores del contenido de arcilla SA y $SD > SP$. En otras palabras para estos tres suelos la capacidad de retención de agua y la CIC se relacionan más con el contenido de MOS que con la textura. Además entre la textura del suelo agrícola y la del suelo degradado no se presentaron diferencias significativas (Tabla 1) aunque sus porcentajes de nitrificación resultaron muy distintos (Tabla 5). Por otra parte la incubación se realizó en condiciones de humedad (80% de la CC de cada suelo) y de aireación consideradas como favorables en este tipo de experimentos para el desarrollo de la microbiota (Paul y Clark, 1989; Alef, 1995; Öhlinger, 1996).

Estos resultados indican que la textura de estos suelos no parece ser un factor que determine las diferencias observadas en los % de nitrificación.

Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC). La CIC afecta el equilibrio entre la concentración de NH_4^+ en la solución del suelo y la cantidad de NH_4^+ adsorbido en las arcillas y la MOS, influyendo tal como se dijo anteriormente sobre la disponibilidad de NH_4^+ para los nitrificantes. Sin embargo el orden de los valores de CIC, SP y SA $> SD$ (Tabla 1) es muy distinto al de los % de nitrificación encontrados, SA \gg SD $> SP$ (Tabla 5). De acuerdo a estos resultados la CIC tampoco parece ser un factor determinante de las diferencias encontradas para los % de nitrificación de estos suelos.

pH. El orden de los valores del pH de los suelos: SA con pH = 7,37; SD con pH = 5,80 y SP con pH = 4,97 (Tabla 1) coinciden con el orden de los valores del % de nitrificación observado en los tres suelos, SA \gg SD $> SP$ (Tabla 5). Estos resultados están de acuerdo con la tendencia informada por Fuentes et al. (2006) que encontraron un incremento en el contenido de NO_3^- al aumentar el pH de un suelo agrícola arcilloso – limoso, desde 4,9 hasta 7,7, por encalado con $CaCO_3$ y también con lo informado por Paul y Clark (1989) que indican que las tasas de nitrificación disminuyen marcadamente por debajo de pH 6,0, y se hacen despreciables por debajo de pH 4,5.

En vista de estos resultados, el pH pudiera ser un factor determinante de las diferencias presentadas en la nitrificación entre estos suelos. Las diferencias de pH entre los suelos posiblemente se deban, en el caso de los suelos de páramo y degradado a diferencias

en el contenido de MOS, alta en el primero y baja en el segundo (Tabla 1), mientras que en el suelo agrícola ha sido modificado artificialmente por encalado debido a su uso intensivo.

Contenido de nutrientes. Los contenidos de bases intercambiables de los suelos (Tabla 1), así como el contenido de P disponible de 560 ppm informado por Machado (2005) para el suelo agrícola y 32 ppm informado por Llambí y Sarmiento (1998) para un suelo de páramo entre 7 y 9 años en descanso cercano al utilizado en este estudio, indican que los % de nitrificación de los suelos estudiados siguen el mismo orden, SA >> SD > SP (Tabla 5), que el contenido de nutrientes distintos de nitrógeno. Estos resultados están de acuerdo con la idea de Verstraete (1981a) en relación a que la capacidad de nitrificación de los suelos agrícolas generalmente está vinculada a la disponibilidad de nutrientes.

En vista de estos resultados, el contenido de nutrientes pudiera ser también un factor importante que determina las diferencias en la nitrificación entre los suelos.

Todos estos resultados permiten concluir que entre las propiedades más importantes que parecen determinar las diferencias en la nitrificación entre los tres suelos estudiados están: el pH y el contenido de nutrientes distintos al N.

Respuesta de los suelos al suministro de gallinazo

La dinámica de mineralización del C proveniente de la descomposición del gallinazo suministrado a los suelos, fue distinta en cada uno de ellos (Fig. 13), resultando que las cantidades de C-CO₂ liberadas de este substrato al final de la incubación presentaron la siguiente tendencia: Suelo Degradado > Suelo de Páramo > Suelo agrícola.

En el caso del suelo degradado, aunque presentó menor contenido de carbono orgánico (Tabla 1) y menor respiración edáfica en comparación con los otros suelos (Figs. 10B, 11B, 12B), sin embargo liberó mayor cantidad de C-CO₂ del gallinazo, alcanzando un valor de 330,3 mg de C-CO₂ Kg⁻¹ al final de la incubación (Fig. 13). De hecho en este suelo el suministro del gallinazo causó un aumento relativo de 117,9% en la respiración edáfica acumulada a los 24 días de incubación, respecto al suelo sin gallinazo (Fig. 11B). La

explicación a este aumento podría ser que la actividad microbiana en este suelo es menor debido al déficit de substratos carbonados y nitrogenados para los descomponedores, consecuencia del proceso de erosión y degradación al cual fue sometido (Monasterio, 1980; Sarmiento y Smith, 2008); sin embargo su potencial de descomposición es mas alto y al suministrar N mineral ($(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$) y un substrato como el gallinazo con alto contenido de C y N lábil y de nutrientes (Machado, 2005), se incrementó la actividad de la microbiota heterótrofa, liberando mayor cantidad de CO_2 . Este CO_2 adicional, estimuló también la actividad de las bacterias nitrificantes, resultando un aumento relativo de 47,2% en el % de nitrificación a los 21 días de la incubación, el cual fue mayor que el aumento observado de 27,6% en el suelo de páramo (Figs. 7D y 8D).

En cambio, el suelo agrícola con contenido de carbono orgánico (Tabla 1) y valores de respiración edáfica intermedios respecto a los otros suelos (Figs. 10B, 11B y 12B), presentó una mineralización del C del gallinazo intermedia a los 3 días (Fig. 13). Luego, a los 7 y 10 días fue similar al suelo de páramo y a partir de los 14 días menor que en los otros suelos (Fig. 13). Sin embargo, el % de nitrificación de este suelo sin gallinazo, a los 7 días de la incubación alcanzó un valor de 78,5% y al suministrar el substrato aumentó hasta 94,2%, lo cual representa un aumento relativo del 20%. Estos resultados indican que en el caso del suelo agrícola, el suministro de gallinazo causa un incremento en la ya elevada nitrificación que presenta al inicio de la incubación; a diferencia de los otros suelos en los cuales los mayores aumentos en la nitrificación, debidos al suministro del gallinazo, ocurrieron hacia el final de la incubación.

Todos estos resultados indican que el suministro de gallinazo estimuló la respiración y la nitrificación en los tres suelos, sin embargo las respuestas fueron diferentes.

En conclusión los resultados obtenidos indican que los porcentajes de nitrificación y la respuesta al gallinazo son distintos en suelos con características físico-químicas diferentes. En el caso de los tres suelos estudiados los resultados sugieren que las propiedades físico-químicas que más influyeron sobre el proceso de nitrificación fueron el pH y el contenido de nutrientes. Por lo tanto se comprueba la hipótesis II planteada.

8. Conclusiones

Los resultados encontrados en el experimento de incubación realizado indican:

- I. **El gallinazo estimula la nitrificación en los suelos estudiados de los Páramos de Mérida, debido a que promueve la producción de CO₂ por parte de los microorganismos heterótrofos del suelo.**

- II. **La magnitud y la dinámica de la respiración edáfica y de la nitrificación, así como su respuesta al suministro de gallinazo, fueron sustancialmente distintas para los tres suelos estudiados de los Páramos de Mérida, con historias de manejo y características químicas diferentes.**

9. Implicaciones de los resultados obtenidos para el manejo de los suelos

En base a los resultados obtenidos, a continuación se presentan algunas implicaciones que resultarían de distintas formas de manejo en campo, de los suelos incluidos en este estudio.

En el caso del suelo agrícola, bajo un manejo intensivo, el NH₄⁺ suministrado como fertilizante mineral, debido al pH básico de estos suelos (con prácticas de encalado) podría perderse por volatilización en forma de NH₃, lo que originaría una ineficiencia en el uso de los fertilizantes, trayendo como consecuencias problemas de contaminación ambiental. Sin embargo, al suministrar gallinazo la nitrificación se vería favorecida y podrían disminuir las pérdidas del NH₄⁺, pero por otro lado, de existir un exceso de riego, el NO₃⁻ producido podría perderse por lixiviación y por desnitrificación en caso de saturación de humedad.

En este sentido, resultaría conveniente conocer más a fondo como se comporta el balance de N en estos cultivos, para recomendar un manejo agrosustentable para este tipo de suelos que son más propensos a pérdidas de N. Sobre todo sería beneficioso evaluar los efectos negativos o positivos del encalado sobre las pérdidas de nutrientes.

Se podría especular que, de haber un suministro balanceado tanto de gallinazo como de fertilizantes amoniacales y un riego bien manejado, se lograría controlar la disponibilidad del N para las plantas y la producción de los cultivos en estos suelos sería favorable.

En el caso del suelo de páramo, que presenta un alto contenido de MOS y un pH ácido, así como un alto potencial de mineralización del C y amonificación del N, el NH_4^+ producido se acumularía en el suelo en gran proporción, debido a la baja nitrificación por efecto del pH ácido característico de estos suelos y podría ser inmovilizado por la microbiota y/o estar disponible para los cultivos. Al suministrar gallinazo y un fertilizante mineral, el NH_4^+ disponible en el suelo nitrificaría lentamente, a menos que aumente el pH por encalado con CaCO_3 , lo cual favorecería la nitrificación, siempre y cuando el NH_4^+ no se pierda por volatilización debido al incremento del pH. Pero en condiciones de un exceso de riego el NO_3^- podría perderse por lixiviación y desnitrificación.

En el suelo degradado, con bajo contenido de MOS y sometido a fuertes procesos de erosión, la nitrificación se limitaría a menos que se adicione un substrato orgánico y un fertilizante amoniacal para que los microorganismos heterótrofos puedan mineralizar C y N y consecuentemente los nitrificantes llevar a cabo el proceso de nitrificación. En este caso, en particular con disponibilidad de agua limitada, el NH_4^+ mineralizado podría quedar atrapado entre las arcillas y/o ser inmovilizado por la microbiota y a su vez la actividad de las bacterias nitrificantes se retardaría en condiciones de baja humedad.

Pensando a futuro, con la visión de restaurar importantes extensiones de terreno que fueron afectadas por el sistema triguero y el pastoreo, el cual causó la degradación y erosión de estos suelos, una estrategia a evaluar podría ser reutilizarlos nuevamente para la agricultura, bajo un control estricto del sistema de manejo agrícola, basado posiblemente en el uso de enmiendas orgánicas como el gallinazo en combinación con fertilizantes amoniacales y un buen sistema de riego. Con lo cual se restauraría la capacidad de campo y la CIC de estos suelos y su fertilidad favorecería la producción de las cosechas, dejándolos capacitados para la agricultura como en algún momento del pasado lo fueron.

10. Perspectivas de investigación en el problema bajo estudio

En vista de los resultados obtenidos, a continuación se plantean propuestas de investigación que permitirían profundizar el conocimiento sobre el tema de la nitrificación:

1. Estudiar las posibles causas metodológicas de la alta desviación observada en las determinaciones de NO_3^- en el suelo agrícola.
2. Estudiar la dinámica de nitrificación en el suelo agrícola a intervalos de incubación más cortos, debido a que durante la incubación a partir de los 10 días ya se había alcanzado el 95% de nitrificación.
3. Evaluar el potencial de nitrificación de otros suelos agrícolas de los páramos de Mérida con el objeto de tratar de encontrar posibles relaciones entre su potencial de nitrificación y las características físico-químicas.
4. Estudiar por separado el efecto de algunas de las características química que afectan a la nitrificación como por ejemplo: el pH y el contenido de nutrientes y que pudieran ser controladas a través de prácticas de manejo.
5. Comparar resultados de la nitrificación obtenidos en condiciones de laboratorio con los obtenidos en campo.
6. Evaluar las implicaciones de la nitrificación en las pérdidas potenciales de N por lavado, desnitrificación y volatilización en distintos suelos agrícolas de los Páramos de Mérida.
7. Desarrollar y validar algún modelo de simulación del proceso de nitrificación y los factores que lo controlan con el objeto de incluirlo en modelos acoplados de fertilización nitrogenada y crecimiento de cultivos.

8. Evaluar la posible relación entre la magnitud de la nitrificación y el tamaño de la población de nitrificantes, con el fin de determinar si el proceso puede inferirse de una determinación poblacional.

11. Referencias bibliográficas

- Acevedo, D., 1994. Metodologías para la determinación del nitrógeno en materiales ecológicos. Postgrado en Ecología Tropical, Centro de Investigaciones Ecológicas de los Andes Tropicales, Universidad de Los Andes, Mérida, Venezuela, 26p.
- Abreu, Z., 2004. Aspectos del ciclado del nitrógeno en un sistema agrícola con descansos largos de los páramos venezolanos. Tesis de Magister Scientiae, Postgrado en Ecología Tropical, Instituto de Ciencias Ambientales y Ecológicas, Universidad de Los Andes, Mérida, Venezuela, 114p.
- Abreu, Z., Sarmiento, L., Bottner, P., 2007. Destino del nitrógeno agregado por fertilización en un cultivo de papa de los Andes de Venezuela. Revista de Agronomía de la Universidad de Zulia. 24(2): 203-228.
- Agren, G., Bosatta, E., 1996. Theoretical Ecosystem Ecology. Understanding Element Cycles. Cambridge, University Press, 234p.
- Alef, K., 1995. Soil respiration. In: K. Alef and P. Nannipieri (Eds.). Methods in Applied Soil Microbiology and Biochemistry. Academic Press, London, pp. 214-220.
- Aparicio, P.M., Arrese, C.I., Becana, M., 2000. Fijación biológica del nitrógeno. Capítulo 16, En: Azcón, J. y Talon, M., (Eds.). Fundamentos de Fisiología Vegetal. Universitat de Barcelona. Barcelona, España, pp. 247-260.
- Aranguren, A., Monasterio, M. 1997. Aspectos de la dinámica del nitrógeno de parcelas con diferentes tiempos de descanso en el Páramo de Gavidia (Andes Venezolanos). En: Libermann, M., Baied, C. (Eds.). Desarrollo sostenible de ecosistemas de montaña: Manejo de áreas frágiles en los Andes. Universidad de las Naciones Unidas y otras instituciones, pp. 171-179.
- Arias, E., 1996. Impactos de las políticas de ajuste estructural en los productores paperos y hortícolas de los Andes Venezolanos: El caso de Pueblo Llano, Estado Mérida. Tesis de Maestría. IVIC, Caracas, Venezuela. 70p.
- Azam, F., Gill, S., Farooq, S., Lodhi, A. 2004. Effect of CO₂ on nitrification and immobilization of NH₄⁺-N. Biology and Fertility of Soils. 40(6): 427-431.
- Azam, F., Gill, S., Farooq, S. 2005. Availability of CO₂ as a factor affecting the rate of nitrification in soil. Soil Biology & Biochemistry 37: 2141-2144.
- Beloso, M. C., 1991. Estudio de la gallinaza como fertilizante agrícola. Tesis Doctoral. Universidad de Santiago de Compostela. Santiago de Compostela, 313p.
- Bouyoucos G.J., 1962. Hydrometer Method Improved for Making Particle Size Analyses of Soils. Agron. J. 54: 464-465.

- Bremner, J.M., Mulvaney, C.S., 1982. Nitrogen –total. In: A.L. Page, R.H. Miller, D.R. Keeney (Eds.) *Methods of soil analysis. Part 2.* 2nd Edition, Agronomy 9: 565-624
- Bowen, W.T., Baethgen, W.E., 1998. Simulation as a tool for improving nitrogen management. In: G.Y. Tsuji, G. Hoogenboom, P.K. Thornton (Eds.). *Understanding options for Agricultural Production.* Kluwer Academic Publishers. The Netherlands, pp. 189-204.
- Carnevali, A., 1944. *Aspectos Económicos y Sociales del Cultivo del Trigo en Los Andes.* Organización de Bienestar Estudiantil, Universidad de Los Andes.
- Casanova, E., 2005. *Introducción a la Ciencia del Suelo.* Universidad Central de Venezuela. Consejo de Desarrollo Científico y Humanístico. Caracas, Venezuela. 482p.
- Cookson, W.R., Cornforth, I.S., Rowarth, J.S., 2002. Winter soil temperature (2–15 °C) effects on nitrogen transformations in clover green manure amended or unamended soils; a laboratory and field study. *Soil Biology & Biochemistry* 34: 1401–1415.
- Contreras, F., 2006. Efecto de la adición de enmiendas orgánicas sobre las actividades enzimáticas (deshidrogenasa, ureasa, fosfomonoesterasa ácida y arisulfatasa) y la mineralización del carbono en suelos del Municipio Rivas Dávila (Estado Mérida). Tesis Doctoral. Postgrado en Ciencia del Suelo, Facultad de Agronomía, Universidad Central de Venezuela, Maracay, 145p.
- CORPOANDES., 1995. *Proyecto Desarrollo Integral Las Cuadras.* Mérida, Venezuela. 156p.
- Felicien, A., 2005. Optimización de la fertilización nitrogenada en un agroecosistema Andino: Un enfoque experimental y de modelización. Anteproyecto de Tesis de Postgrado. Universidad de Los Andes, Instituto de Ciencias Ambientales y Ecológicas, Postgrado de Ecología Tropical, Mérida, Venezuela, 62p.
- Felicien, A., 2008. Optimización de la fertilización nitrogenada en un agroecosistema Andino: Un enfoque experimental y de modelización. Avance de Tesis de Postgrado. Universidad de Los Andes, Instituto de Ciencias Ambientales y Ecológicas, Postgrado de Ecología Tropical, Mérida, Venezuela, 80p.
- Fuentes, J.P., Bezdicek, D.B., Flury, M., Albrecht, S., Smith, J.L., 2006. Microbial activity affected by lime in a long-term no-till soil. *Soil & Tillage Research* 88: 123–131.
- Grant, R.F., 1994. Simulation of ecological controls on nitrification. *Soil Biology & Biochemistry* 26(3): 305–315.
- Gutiérrez, A., 1996. *Plan estratégico de desarrollo agrícola del Estado Mérida: Documento sobre el sector agrícola.* Centro de Investigaciones Agroalimentarias, Facultad de Ciencias Económicas y Sociales, Mérida, Venezuela, 30p.

- Halitligil, M.B., Akin, A., Ýlbeyi, A., 2002. Nitrogen balance of nitrogen-15 applied as ammonium sulphate to irrigated potatoes in sandy texture soils. *Biol. Fertil. Soils*. 35: 369-378.
- Hattori, T., 1973. *Microbial life in the soil. An introduction*. Marecl Dekker. New York. 437p.
- Hoyle, F.C., Murphya, D.V., Fillery I.R.P., 2006. Temperature and stubble management influence microbial CO₂-C evolution and gross N transformation rates. *Soil Biology & Biochemistry* 38: 71-80.
- IGCA., 1978. *Métodos analíticos del laboratorio de suelos*. Instituto Geográfico "Agustín Codazzi". Ministerio de Hacienda y Crédito Público. Bogotá, Colombia, 663p.
- Jackson, M.L., 1976. Acidez del suelo. En: *Análisis Químico de Suelos*. Tercera Edición. Omega S.A. Barcelona, España. 78p.
- Kandeler, E., 1996. Nitrification during long-term incubation. In: F. Schinner, R. Öhlinger, E. Kandeler, R. Margesin (Eds.). *Methods in Soil Biology*. Springer. Germany, pp. 149-151.
- Kinsbursky, R.S., Saltzman, S., 1990. CO₂-nitrification relationships in closed soil incubation vessels. *Soil Biology & Biochemistry* 22: 571-572.
- Klute, A., 1986. Water retention: Laboratory methods. In: Klute A. (Ed.), *Methods of soil analysis. Part 1. Physical and mineralogical methods*. Agronomy. 9: 635-662.
- Llambí, L. D., 1997. Recuperación de la fertilidad en una sucesión en el Páramo: Biomasa microbiana y ciclaje de nitrógeno. Trabajo Especial de Grado en la Licenciatura de Biología. Universidad Simón Bolívar, Sartenejas, Venezuela, 128p.
- Llambí, L. D., Sarmiento, L., 1997. Dinámica de la fertilidad en parcelas agrícolas en descanso en el Páramo de Gavidia: biomasa microbiana y ciclaje de N. *Memorias del Congreso Venezolano de la Ciencia del Suelo*. CD-ROM. No. DL FR 2529710.
- Llambí, L.D. Sarmiento, L., 1998. Biomasa microbiana y otros parámetros edáficos en una sucesión secundaria de los páramos venezolanos. *Ecotrópicos* 11(1): 1-14.
- Machado, D., 2005. *Un Enfoque Agroecosistémico para el Manejo Eficiente de Nitrógeno en el Cultivo de Papa en los Andes Venezolanos*. Tesis Doctoral. Universidad de Los Andes, Instituto de Ciencias Ambientales y Ecológicas, Postgrado de Ecología Tropical. Mérida, Venezuela, 233p.
- Monasterio, M., 1980. Poblamiento humano y uso de la tierra en los altos Andes de Venezuela. En: Monasterio, M. (Ed). *Estudios Ecológicos en los Páramos Andinos*. Editorial de la Universidad de Los Andes, Mérida, pp. 170-198.

- Nömmik, H., 1981. Fixation and biological availability of ammonium in soil clay minerals. In: Clark, F. E. & Rosswall, T. (Eds.). *Terrestrial Nitrogen Cycles*. Ecol. Bull. (Stockholm) 33: 273-279.
- Öhlinger, R., 1996. Soil respiration by titration. In: F. Schinner, R. Öhlinger, E. Kandeler, R. Margesin (Eds.). *Methods in Soil Biology*. Springer. Germany, pp. 95-98.
- Paul, E.A. and Clark, F.E. 1989. *Soil Microbiology and Biochemistry*. Academic Press, Inc. USA, 273p.
- Power, J. F., 1981. Nitrogen in the cultivated ecosystem. En: Clark, F. E. & Rosswall, T. (Eds). *Terrestrial Nitrogen Cycles*. Ecol. Bull. (Stockholm) 33: 529-546.
- Rojas, L.A., Castillo, L.E., 1989. Determinación de amonio, nitratos y nitritos. En: Instituto Colombiano Agropecuario, ICA (Ed.). *El Análisis de Suelos, Plantas y Aguas para Riego*. Manual de Asistencia Técnica N° 47. Bogotá, pp. 27-40.
- Romero, L., 2005. La Estrategia de la Semilla en el Sistema Papero de Los Andes de Mérida. Una Visión desde La perspectiva Agroecológica. Tesis Doctoral. Universidad de Los Andes, Instituto de Ciencias Ambientales y Ecológicas, Postgrado de Ecología Tropical. Mérida, Venezuela, 140p.
- Sarmiento, G., 1984. El ciclo del nitrógeno. Capítulo 8, En: *Los Ecosistemas y la Ecósfera*. Editorial Blume Ecología. España, pp. 138-155.
- Sarmiento, L., Monasterio, M., 1993. Elementos para la interpretación ecológica de un sistema agrícola campesino de los Andes venezolanos (páramo de Gavidia). En: Rabey, M. (Ed.). *El Uso Tradicional de los Recursos Naturales en Montañas: Tradición y Transformación*. UNESCO-ORCYT. Montevideo, pp. 55-77.
- Sarmiento, L., 1995. Restauration de la fertilité dans un système agricole à jachère longue des hautes Andes du Venezuela. Docteur en Sciences Thèse. Université de Paris-Sud, Paris, 237p.
- Sarmiento, L., Bottner P., 2002. Carbon and nitrogen in two soils with different fallow times in the high tropical Andes: indications for fertility restoration. *Applied Soil Ecology*. 19: 79-89.
- Sarmiento, L., Smith, J.K., Escalona, A., Marquez, N., Mendez, Z., Guillén, F. 2005. Degradación de laderas a consecuencia del cultivo de trigo en los Andes venezolanos: Estado actual y factores que limitan la regeneración. Pp: 223 en VI Congreso Venezolano de Ecología: Recuperación de Ecosistemas y Calidad de Vida: Estrategias para el nuevo milenio. Maracaibo Noviembre 2005.
- Sarmiento, L., Smith, J.K., 2008. Estado actual de las laderas degradadas por el cultivo de trigo en los Andes venezolanos y factores que limitan su restauración. En: Herrera,

- F., Herrera, I. (Ed.). Experiencias de Restauración en Venezuela. Ediciones del IVIC (enviado).
- Smith, R. L., Smith, T., 2002. Ecología. 4a. Edición. Addison, Wesley. 642p.
- Sutton, D.W., 1998. Ciclos biogeoquímicos y balance de nutrientes. Capítulo 7, En: Fundamentos de Ecología. Editorial Limusa Noriega. México, pp. 139-156.
- Ünlü, K., Özenirler, G., Yurteri, C., 1999. Nitrogen fertilizer leaching from cropped and irrigated sandy soil in Central Turkey. European Journal of Soil Science. 50: 609-620.
- Velásquez, N., 2001. El sistema socio-ambiental Andino Venezolano y la Modernización de la Agricultura: 1930-1995. Tesis Doctoral. Postgrado en Ecología Tropical, CIELAT, Universidad de Los Andes, Mérida, Venezuela, 185p.
- Verstraete, W., 1981a. Nitrification. In: Clark, F. E. & Rosswall, T. (Eds). Terrestrial Nitrogen Cycles. Ecol. Bull. (Stockholm) 33: 303-314.
- Verstraete, W., 1981b. Nitrification in agricultural systems: call for control. In: Clark, F. E. & Rosswall, T. (Eds). Terrestrial Nitrogen Cycles. Ecol. Bull. (Stockholm) 33: 565-576.
- Woomer, P. L., Swift M. J. (Eds.) 1994. The Biological Management of Tropical Soil Fertility. John Wiley and Sons Inc, UK, 242p.
- Watzka, M., Buchgraber, K., Wanek, W., 2006. Natural ¹⁵N abundance of plants and soils under different management practices in a montane grassland. Soil Biology & Biochemistry 38: 1564-1576.

12. Anexos



Anexo 1.
Parcela de muestreo del Suelo de Páramo, ubicada en localidad en Gavidea (3560 msnm).



Anexo 2.
Parcela de muestreo del Suelo Degradado, ubicada en la localidad de La Angostura-Misintá (3450 msnm).



Anexo 3.
Parcela de muestreo del Suelo Agrícola, ubicada en la localidad de Mistique (2960 msnm).



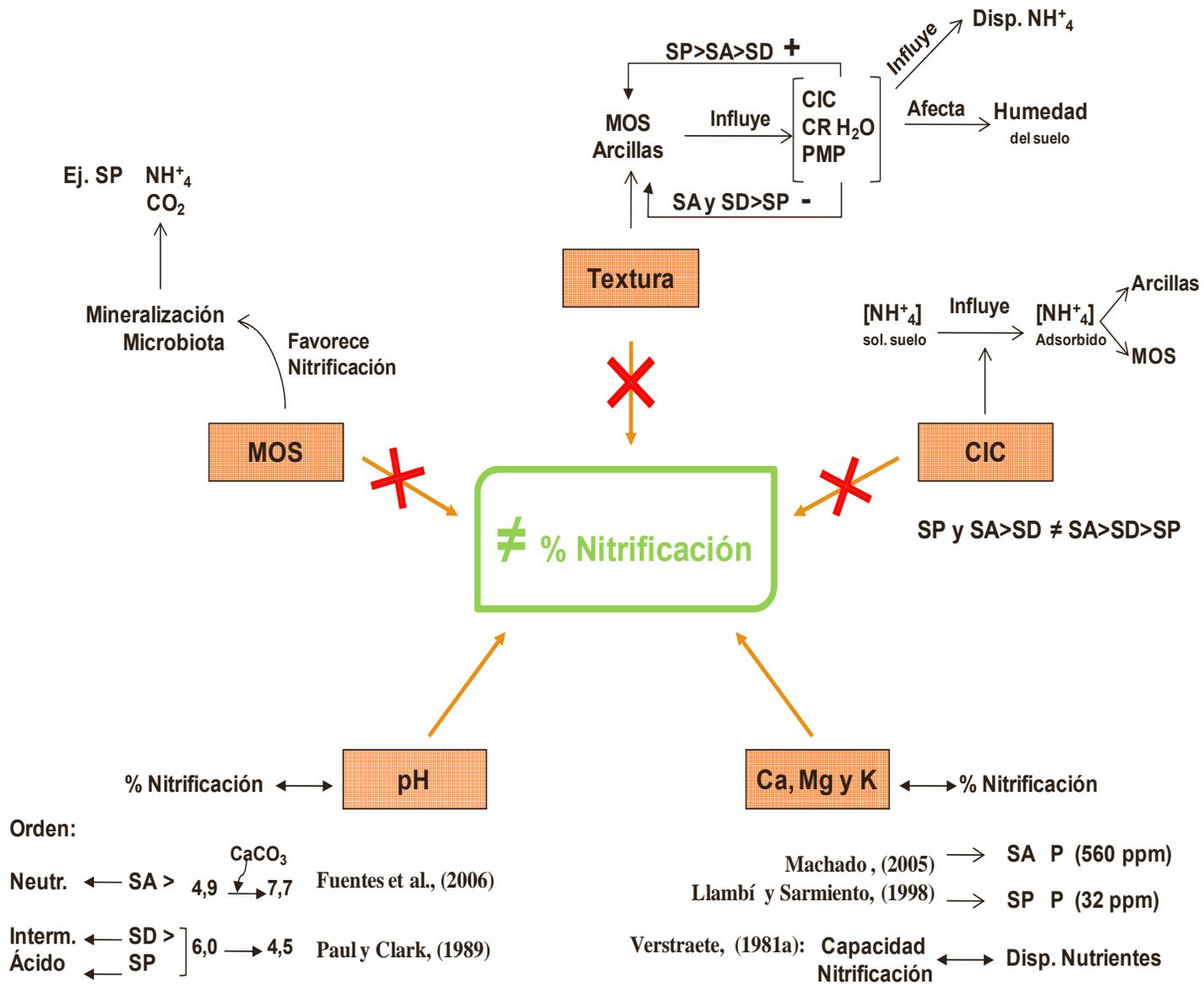
Anexo 4.
Substrato orgánico gallinazo (excremento de aves de corral)



Anexo 5.
Actividades experimentales en el Laboratorio de Análisis Químico del ICAE.



Anexo 6.
Muestras de suelo en cámara de incubación en condiciones controladas de laboratorio.



Anexo 7. Análisis de algunas propiedades físico-químicas como posibles causas de las diferencias en la nitrificación.