

MINERALIZACION DEL NITROGENO EN SUELOS  
BAJO CULTIVO DE CACAO

Tesis de grado  
para  
Magister Scientiae

Hugo Nervilio Martínez Báez

Instituto Interamericano de Ciencias Agrícolas de la O.E.A.  
Centro Tropical de Enseñanza e Investigación  
Departamento de Cultivos y Suelos Tropicales  
Turrialba, Costa Rica  
Marzo, 1972

MINERALIZACION DEL NITROGENO EN SUELOS  
BAJO CULTIVO DE CACAO

Tesis

Presentada al Consejo de la Escuela para Graduados  
como requisito parcial para optar al grado


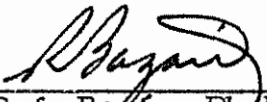


de

Magister Scientiae

en el

Instituto Interamericano de Ciencias Agrícolas de la O.E.A.

APROBADA:

 _____ Mario Blasco L., Ph.D.	Consejero
 _____ Rufo Balán, Ph.D.	Comité
 _____ José Fargas, Ph.D.	Comité
 _____ Adalberto Gorbitz, Ing. Agr.	Comité

Marzo, 1972

A mis padres

A mis hermanos

A los hermanos pueblos

latinoamericanos

## AGRADECIMIENTOS

El autor expresa su agradecimiento al Dr. Mario Blascó L., Consejero Principal, por su valiosa orientación y colaboración.

A los doctores Rufo Bazán, José Fargas y al Ing. Adalberto Gorbitz, miembros del Comité Consejero.

A la Universidad Autónoma de Santo Domingo, República Dominicana.

A la Zona Norte del Instituto Interamericano de Ciencias Agrícolas.

A todos los profesores, compañeros, amigos y relacionados, que de una u otra manera contribuyeron a la realización de este trabajo.

## BIOGRAFIA

El autor nació en las Matas de Farfán (República Dominicana) el 22 de enero de 1941.

Sus estudios secundarios los comenzó en el Liceo Enriquillo de San Juan de la Maguana en el año de 1958 y los terminó en el Liceo Juan Pablo Duarte en Santo Domingo en el 1961.

En el 1962 ingresó a la Escuela de Agronomía, Facultad de Ciencias Agronómicas y Veterinarias, en la Universidad Autónoma de Santo Domingo y se graduó de Ingeniero Agrónomo en 1969. En ese mismo año desempeñó el cargo de Profesor Auxiliar en Edafología, en la Universidad Autónoma de Santo Domingo.

En setiembre del 1970 ingresó a la Escuela para Graduados del Instituto Interamericano de Ciencias Agrícolas, Centro Tropical de Enseñanza e Investigación, obteniendo el grado de Magister Scientiae en marzo del 1972.

## CONTENIDO

	<u>Página</u>
1. INTRODUCCION.....	1
2. REVISION DE LITERATURA.....	3
2.1 El N en el suelo .....	3
2.2 Relación C/N en el suelo.....	5
2.3 Mineralización del N .....	7
2.3.1 Amonificación .....	9
2.3.2 Nitrificación.....	10
2.3.2.1 Algunas condiciones del suelo que influyen en la nitrificación .....	13
Humedad y aireación .....	13
Temperatura .....	14
Reacción del suelo .....	15
Materia orgánica y fertilizantes.....	16
3. MATERIALES Y METODOS .....	18
3.1 Suelos .....	
3.1.1 Serie La Margot, fase normal .....	18
3.1.2 Serie Instituto, fase normal.....	19
3.1.3 Serie Reventazón.....	20
3.2 Procedimiento experimental .....	21
3.3 Métodos analíticos .....	23
3.4 Métodos estadísticos .....	24
4. RESULTADOS .....	26
4.1 Estado del nitrógeno en los suelos estudiados .....	26
4.2 Efectos de la adición de materia orgánica en la mineralización del nitrógeno y producción de CO <sub>2</sub> ..	28
4.3 Nitrógeno y carbono adicionado por los residuos vegetales y su relación con el N-total del suelo.....	31
4.4 Producción de NH <sub>3</sub> y NO <sub>3</sub> en las series de suelos estudiadas.....	34
4.5 Resultados estadísticos en la mineralización del nitrógeno, en los suelos estudiados.....	35

	<u>Página</u>
4.5.1 Efecto de fertilizantes en la producción de N-NH <sub>3</sub> en las tres series de suelo y los dos períodos de incubación .....	35
4.5.2 Efecto de fertilizantes en la producción de N-NO <sub>3</sub> en las tres series estudiadas y los dos períodos de incubación .....	40
4.5.3 Necesidad de N, P, K, Mg y S (valores estimados) según la serie de suelo y el período de incubación .....	43
4.5.3.1 Producción de N-NH <sub>3</sub> en 5 y 10 semanas de incubación para las tres series de suelo .....	43
4.5.3.2 Producción de N-NO <sub>3</sub> en 5 y 10 semanas de incubación para las tres series de suelos estudiadas...	45
5. DISCUSION .....	47
6. CONCLUSIONES .....	55
7. RESUMEN .....	58
7a. SUMMARY .....	60
8. LITERATURA CITADA .....	62
APENDICE .....	70

## LISTA DE CUADROS

<u>Cuadro N°</u>		<u>Página</u>
1	Concentración y formas de nitrógeno, contenido de carbono y pH en los suelos estudiados .....	27
2	Superficie de respuesta de N-NH <sub>3</sub> y N-NO <sub>3</sub> como función de N, P, K, Mg y S, en 5 y 10 semanas de incubación .....	36
3	Necesidad de N, P, K, Mg y S (valores estimados) para la producción de N-NH <sub>3</sub> (amonificación) en los suelos estudiados .....	44
4	Necesidad de N, P, K, Mg y S (valores estimados) para la producción de N-NO <sub>3</sub> (nitrificación) en los suelos estudiados .....	44
5	Tratamientos utilizados, de acuerdo al diseño de superficie de respuesta con composición central, en los estudios de mineralización del N en las series La Margot, Instituto y Reventazón.....	71
6	Mineralización del nitrógeno (N-NH <sub>3</sub> y N-NO <sub>3</sub> ) en los suelos estudiados incubados con adición de materia orgánica .....	74
7	Producción de CO <sub>2</sub> en los suelos incubados con distintos niveles de materia orgánica .....	75
8	N-total y peso de las hojas adicionadas por el cacao y su sombrío, a los suelos estudiados.....	76
9	Carbono, nitrógeno y relación C/N promediados de los residuos vegetales de cacao y su sombrío, recibidos por los suelos estudiados .....	76
10	N-NH <sub>3</sub> , N-NO <sub>3</sub> y N-mineral en el suelo de la serie La Margot, incubado (28-30°C y 0,33 bares) con distintos tratamientos .....	77
11	N-NH <sub>3</sub> , N-NO <sub>3</sub> y N-mineral en el suelo de la serie Instituto, incubado (28-30°C y 0,33 bares) con distintos tratamientos .....	80
12	N-NH <sub>3</sub> , N-NO <sub>3</sub> y N-mineral en el suelo de la serie Reventazón incubado (28-30°C y 0,33 bares) con distintos tratamientos .....	83



## LISTA DE FIGURAS

<u>Figura N°</u>		<u>Página</u>
1	Efecto de la adición de materia orgánica en la nitrificación de los suelos estudiados y en la actividad de los microorganismos (5 semanas de incubación) .....	29
2	Efecto de la adición de materia orgánica en la nitrificación de los suelos estudiados y en la actividad de los microorganismos (10 semanas de incubación) .....	30
3	Concentración de N-total en los residuos y su relación con el N-total del suelo .....	32
4	Concentración de N-total en los residuos determinados cada mes .....	33
5	Influencia de los elementos aplicados (N, P, K, Mg y S) en la amonificación y nitrificación de los suelos estudiados .....	53

---oooOooo---

## 1. INTRODUCCION

El cacao (Theobroma cacao) es una planta perenne que durante su ciclo vegetativo deja caer gran cantidad de hojas, flores, frutos y ramas al suelo, los cuales indudablemente sufren transformaciones que inciden en el contenido de N-total del suelo. Esto es también complementado con los residuos orgánicos de los árboles de sombra que contribuyen al aumento de la materia orgánica en los suelos de cacao.

La mayor parte del nitrógeno asequible a las plantas de cacao proviene de la mineralización de estos compuestos orgánicos nitrogenados que llegan al suelo, los cuales tienen entre 80 y 95% de nitrógeno.

Como el nitrógeno es uno de los elementos tomados en mayor cantidad por las plantas de cacao en su nutrición, es muy conveniente estudiar la manera de aumentar el suministro de este elemento a través de los residuos que en estos suelos abundan. Es precisamente a través de la mineralización, favoreciéndola en su proceso, que se podría estimular la población microbiana para que intervenga en la transformación de estos compuestos orgánicos nitrogenados y ponga los elementos nutritivos en forma asequible a las plantas.

El presente trabajo es una contribución al estudio de la mineralización del N. Los objetivos principales de este trabajo son:

1. Medir la mineralización del N en los suelos de las tres series estudiadas, La Margot, Instituto y Reventazón, de la región de Turrialba, Costa Rica, en muestras incubadas por 5 y 10 semanas con diferentes tratamientos.

2. Estudiar el efecto del N que agregan las hojas de los árboles de cacao y su sombrío y relacionarlo con el N-total de los suelos estudiados.
3. Estudiar el efecto del contenido de N en los suelos de las series La Margot, Instituto y Reventazón, sembrados con árboles de cacao y su sombrío.

## 2. REVISION DE LITERATURA

### 2.1 El N en el suelo

En general el contenido de N-total en los suelos varía entre 0,1 y 0,5%, aunque puede presentarse amplias variaciones dependientes del medio ecológico y el tipo de suelo (18, 34, 53). Molina y Blasco (73), estudiando suelos volcánicos del Altiplano de Pasto, Colombia, señalan cantidades adecuadas de N-total (alrededor de 4000 ppm) y N-orgánico. El  $\text{NH}_4$  nativo fijo hallado fue en promedio 1,90 a 4,13% del N-total. El  $\text{NH}_4$  intercambiable estuvo comprendido entre 1,40 y 2,43% en promedio del N-total, los cuales son menores que los obtenidos en otros suelos no volcánicos de Colombia. Gómez et al. (58) reportan también contenidos de N-total entre 0,11 y 0,39% en la capa arable de los suelos del Valle del Cauca, Colombia.

Díaz-Romeu et al. (48) encontraron un valor promedio de N-total de 0,49% en suelos de América Central. Los valores extremos oscilan entre 0,05 y 2,7%. Estos autores dicen que la agrupación de los suelos estudiados conforme a las formaciones ecológicas indica, sin embargo, una tendencia de aumento del contenido de N-total de las formaciones tropicales muy secas a las muy húmedas. Ellas reflejan los efectos de la temperatura y vegetación e indirectamente de la precipitación y la altitud a que se encuentran los suelos. Jenny, citado por Díaz-Romeu et al. (48), estudió comparativamente el contenido de N y materia orgánica en suelos de clima templado, encontrando que dependen de los factores edáficos o sea clima, tiempo, topografía, factores bióticos y material parental. Llegó a observar que el clima (especialmente la lluvia y temperatura) y

la vegetación son los que más influyen. El clima tiene efecto no sólo sobre la cantidad de N-total que hay en el suelo sino también sobre la cantidad de N asimilable por las plantas.

El N en el suelo se puede presentar en forma elemental, en forma de compuestos inorgánicos así como orgánicos. El N-elemental ( $N_2$ ) se presenta en forma gaseosa en el aire del suelo y disuelto en pequeñas cantidades en la solución del suelo, algunas veces es adsorbido en la superficie de las partículas del suelo (53). Porter y Stewart (76) determinaron que el N-inorgánico es fijado por las arcillas y es liberado cuando estos minerales de silicatos son destruidos al tratarse con ácido fluorhídrico (HF).

En forma inorgánica se presenta como óxido nitroso ( $N_2O$ ), óxido nítrico (NO), dióxido ( $NO_2$ ), amoníaco ( $NH_3$ ) y además como amonio ( $NH_4^+$ ), nitrito ( $NO_2^-$ ) y nitrato ( $NO_3$ ). Estas formas inorgánicas constituyen hasta un 2% del N-total del suelo (53). Galaktionova (56), estudiando suelos turbosos de Rusia, determinó que tanto las turbas bajas como las altas fijan N-amoniacaal en forma directamente proporcional al contenido de sustancias húmidas.

Bear (6) señala que la materia orgánica del suelo que se ha descompuesto hasta perder su identidad contiene, corrientemente, alrededor del 5% de N en su materia seca. Así, un suelo que contenga 3% de materia orgánica tendría una cantidad de N de 0,15% aproximadamente, valor medio en los suelos cultivados de las regiones húmedas. Yankivilch, citado por Russell (81), encontró en Túnez que leguminosas anuales como guisantes, lentejas, etc., fijan entre 450 y 560 Kg/ha de N, añadiendo 225 Kg/ha de N al suelo. La cosecha subsiguiente de mijo respondió acentuadamente a este residuo.

Recientemente Suárez (86) encontró valores de 1746 a 5674 ppm de N-total en suelos tropicales de Costa Rica. Reporta cantidad de N-proteínico de 33 y 66% respecto al N-total, las cuales son superiores a las halladas (20-40%) en suelos de zonas templadas (23, 77, 85). Esto es importante si se toma en cuenta que un alto porcentaje de N-amino-ácidos influye favorablemente en el manejo del suelo, pues constituye el N-orgánico activo (77). Dentro de la literatura consultada éste es el único dato para suelos de Latinoamérica, ya que sólo se han reportado datos de la zona templada y dentro de América nada más para suelos de Estados Unidos y Canadá.

## 2.2 Relación C/N en los suelos

La relación C/N en los suelos es un índice particularmente preciso que determina, más bien, la riqueza de N del humus y, por lo tanto, del suelo. El contenido en C del suelo es sensiblemente proporcional al contenido de N. Una relación C/N baja favorece la mineralización, principalmente en el caso de la materia orgánica poco transformada. Con un C/N mayor que 25 la mineralización es lenta y se produce poco N; por lo tanto, la velocidad de mineralización aumenta a medida que desciende la relación. Es pues éste un criterio que permite distinguir bien los distintos tipos de humus (50). En los suelos cultivados la relación C/N tiende a estabilizarse, es característica de la microflora, de 8 a 10 en los suelos biológicamente activos.

Hardy (61), trabajando en las Antillas Occidentales, dice que la determinación de la relación C/N de la capa arable es útil para evaluar la capacidad productiva probable de suelos de cacao cuyas características

físicas son satisfactorias. Es numéricamente más alta en los suelos de buenos rendimientos.

Los valores bajos encontrados en algunos suelos son explicados por la presencia de mayores cantidades de N-inorgánico, de manera especial en  $\text{NH}_4^+$  fijado en minerales arcillosos (53).

En los suelos de las regiones húmedas y también en los de las zonas templadas, el valor de la relación C/N es de 10/1, la cual es bastante constante (6, 79).

Jenny, citado por Robinson (79), estudiando una serie de suelos en los EE.UU., llegó a la conclusión de que la relación aumenta al disminuir la temperatura. Sin embargo, McLean (70), examinando muchos suelos tropicales, encontró relaciones C/N considerablemente superiores a 10/1.

La relación C/N es función del grado de mineralización de la materia orgánica. En la región central de Francia la relación es baja, de 10 a 12, y no varía mucho con la profundidad, en suelos rojos no lixiviados (21).

Díaz-Romeu et al. (48), estudiando suelos de América Central, encontraron una relación C/N promedio de 10,07 y oscilaba, en la mayoría de los suelos, entre 8 y 16. Estos autores observaron también que la relación presentó correlación inversa con el  $\text{pH}$  de los suelos estudiados según la siguiente ecuación:

$$\log y_{\text{C/N}} = 1,346 - 2,536 \log_{\text{pH}} \quad r = -0,412$$

Después que la materia orgánica ha sido descompuesta parcialmente, la asimilación del N disminuye y aparecen en el suelo subproductos amoniacales. Las condiciones volverán a ser favorables para la

nitrificación y los nitratos podrán de nuevo acumularse. De esta manera la relación C/N, a través de su influencia selectiva sobre los microorganismos del suelo, ejerce un control poderoso sobre la nitrificación y la presencia de N en forma de nitrato en el suelo (34, 87).

### 2.3 Mineralización del N

La mineralización del N consiste en una serie de procesos a través de los cuales los compuestos orgánicos, de animales o vegetales, son transformados a formas inorgánicas nitrogenadas:  $\text{NH}_4$ ,  $\text{NO}_2$  y  $\text{NO}_3$  (53). Dentro de estos procesos existen dos secuencias bien establecidas: 1) La transformación de los materiales orgánicos a amoníaco ( $\text{N-NH}_3$ ) por una gran diversidad de microorganismos heterótrofos. 2) El paso de amoníaco a nitrato ( $\text{N-NO}_3$ ) con intervención de microorganismos quimo-autotróficos obligatorios (37).

Las proteínas, animales o vegetales, ácidos nucleicos y sus derivados en el suelo, se desintegran por acción enzimática de los microorganismos (o por acción química) en amoníaco y otros compuestos, luego el amoníaco se transforma a nitritos y éstos a nitratos (10), es decir:

Proteínas → metaproteínas → proteosas → peptonas →  
polipéptidos → aminoácidos → amoníaco → nitritos → nitratos

Acidos nucleicos (base de purina y pirimidina) → mononucleótidos → amoníaco → nitritos → nitratos

Habrà siempre una competencia entre microorganismos y plantas superiores por los nutrimentos aprovechables y las exigencias de los primeros deberán satisfacerse antes que las plantas. Sin embargo, en



condiciones normales del suelo, la competencia ofrecida por los microorganismos no tiene mucho efecto, pero si se añaden grandes cantidades de materiales carbonáceos, con frecuencia ocurre una deficiencia de N asimilable en el suelo debido a que es utilizado por los microorganismos para la descomposición del material (72). La adición de materiales orgánicos en las fases iniciales de su descomposición deprime la mineralización del N debido a que una gran producción de carbohidratos inhibe la acción de la proteínasa, enzima necesaria en esta transformación (15, 39). De ahí que varios investigadores (8, 89) señalen que siempre que los materiales orgánicos incorporados al suelo tenga 1,5% ó menos de N (una relación C/N de 25 ó mayor) se producirá inmovilización del N, mientras que si el N en los materiales supera el 1,5% predominará la mineralización.

En suelos de origen volcánico la mineralización del N es restringida debido a que el complejo alofano-materia orgánica es difícilmente atacable por los microorganismos (15, 20, 32). Pineda (75) también encontró, en suelos de origen volcánico de Costa Rica, relación inversa entre el contenido de alofano y la mineralización del N-orgánico y dice que el secamiento-humedecimiento de suelos volcánicos y aluviales activa significativamente la mineralización en la mayoría de los casos, especialmente cuando las muestras estudiadas fueron más arcillosas.

En suelos volcánicos de Chile (suelos Uadis) la mineralización del C y N se efectúa en forma regular pero lentamente debido a la falta de una fuente de energía disponible para la población microbiana, puesto que parte del C estaría unido al coloide mineral formando un complejo

arcillo-húmico. Esto permite la acumulación de materia orgánica (88). Robinson (80) observó que en suelos del este de Africa el fraccionamiento (< 2 mm) de muestras de la capa arable tuvo influencia significativa en la mineralización del N. Especifica que no hubo evidencia para sugerir que la fracción del suelo refinada, menor que 2 mm, sería una desventaja para la determinación del N mineralizable, por los métodos de incubación.

### 2.3.1 Amonificación

Amonificación es la conversión de los compuestos orgánicos nitrogenados en amoníaco (10) y no requiere de microorganismos especializados, por lo que es un proceso heterotrófico donde actúan hongos, bacterias y actinomicetos (10, 87).

El ataque enzimático se produce en los enlaces péptidos de los aminoácidos que forman las proteínas. Los aminoácidos liberados sirven de fuente de carbono y N a los microorganismos del suelo. El N lo toman a partir del amoníaco liberado de los aminoácidos por desaminación y el carbono es liberado por descarboxilación (10). La amonificación es favorecida cuando el suelo está bien aireado y drenado, también cuando tiene cationes alcalinos como Ca, Mg, K, etc. (34). En suelos de Colombia la adición de carbonato de calcio incrementó la producción de N-NH<sub>3</sub>. En suelos no tratados el N mineral estaba en forma de N-NH<sub>3</sub> y hubo buena relación entre el amonio y la producción de CO<sub>2</sub> (51).

Shaw (82) dice que en suelos livianos o arenosos (no pesados) de Inglaterra, el N-amoniaco no es lixiviado de la capa superficial. Esto está dentro de lo que concretan varios autores (53, 70, 87), de que el N-amoniaco en el suelo puede tener cuatro destinos. Primero, grandes

cantidades son tomadas por algunos de los propios organismos amonificantes o por otros que pueden usar el N en esta forma, como los hongos de las micorrizas que sin dudas pueden absorber N-amoniacal e incluso pasarlo, de alguna manera, a su huésped. Segundo, las plantas superiores pueden usar esta forma del N, inclusive fácilmente, sobre todo las plantas jóvenes, aunque parece que crecen mejor cuando utilizan la forma nítrica. Algunas, como el arroz, prefieren el N-amoniacal en vez del nítrico. Tercero, los iones  $\text{NH}_4^+$  pueden ser fijados por algunos minerales arcillosos. (Los suelos con ilitas pueden fijar, en el horizonte C, hasta un 50% de N-total). Estos iones son, más o menos, del mismo tamaño que los iones de K y son retenidos por las arcillas que fijan K, como ilitas y otras semejantes. El N así fijado no puede oxidarse rápidamente pero sí puede, a veces, ser aprovechable por las plantas cuyas raíces profundizan mucho y lo pueden tomar de las arcillas. Cuarto, el  $\text{NH}_4$  es oxidado hasta el nivel de nitratos por ciertas bacterias que lo usan no sólo como fuente de N sino también como fuente de energía.

### 2.3.2 Nitrificación

Nitrificación es el proceso de oxidación enzimática provocado por algunas bacterias en que el producto final es N en forma de nitratos ( $\text{NO}_3^-$ ). Tiene lugar en dos etapas coordinadas en las cuales intervienen dos grupos de diferentes bacterias. El primer paso es la producción de óxido nítrico, seguido inmediatamente por su oxidación a la forma nítrica (34). La transformación a nitratos es muy activa y evita la acumulación de nitritos. Esto es favorable pues el ion nitrito es tóxico, en determinada concentración, para las plantas (34, 79).

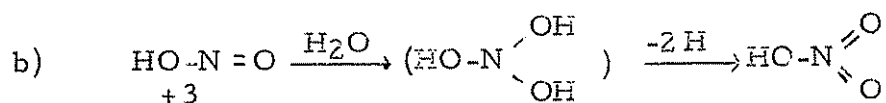
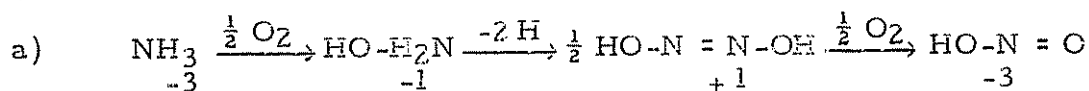
Este proceso es completamente aerobio y en él los microorganismos que toman parte son bacterias que se caracterizan por su metabolismo quimioautotrófico obligatorio, derivando su energía de la oxidación del amoníaco a nitrito y nitrato (10). Cabe hacer notar que la oxidación del amoníaco se hace vía hidroxilamina y que para esto es necesaria la presencia de cobre (2, 5).

Las bacterias que entran en la nitrificación se pueden clasificar en dos grupos:

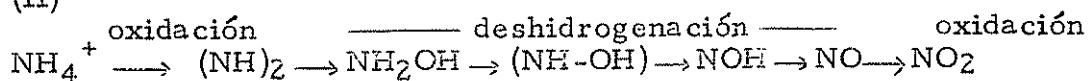
- a. Las oxidadoras de amoníaco. Son los géneros Nitrosomonas, Nitrosocystis, Nitrosococcus, Nitrosospira y Nitrosoglcea.
- b. Las oxidadoras de nitritos. Son los géneros Nitrobacter y Nitrocystis.

Dentro de todos los géneros mencionados los más importantes en los suelos son Nitrosomonas y Nitrobacter (10). La oxidación amoniacal por efecto de estas bacterias quimioautotróficas puede ocurrir de varias maneras (2, 5, 74):

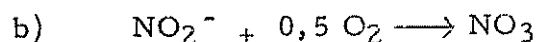
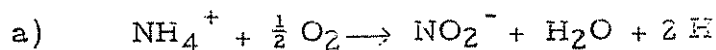
(I)



(II)



(III)



Los compuestos intermedios que se pueden formar en la nitrificación se dan a continuación en el cuadro propuesto por Nicholas (74):

N° átomo	Fórmula	Compuesto
+5	$\text{NO}_3^-$	Nitrato
+4	$\text{NO}_2$	Dióxido de nitrógeno
+3	$\text{NO}_2^-$	Nitrito
+2	$\text{NO}$	Oxido nítrico
+1	(NOH)	Nitroxilo
	$\text{N}_2\text{O}$	Oxido nitroso
	$\text{N}_2\text{O}_2^-$	Hiponitroso
	$\text{NO}_2\text{NH}_2$	Nitramida o ácido imidonítrico
	$\text{NH}(\text{OH})_2$	Dihidroxiamoniaco
0	$\text{N}_2$	Nitrógeno
	$\text{OH NH} \cdot \text{NH} \cdot \text{OH}$	Dihidroxilhidrazina
-1	$\text{NH}_2\text{OH}$	Hidroxilamina
-2	$\text{H}_2\text{N} \cdot \text{NH}_2$	Hidrazina
-3	$\text{NH}_4^+$	Amonio

La nitrificación se produce rápidamente en condiciones ideales de temperatura, suelo y humedad; de ahí que Broadbent, Tyler y Hill (31) hayan encontrado tasas diarias de 3 a 11 Kg de N por 1 millón de kilos de suelo, al que se había añadido 50 Kg de N en forma amoniacal.

Según Shaw (82), en suelos de Inglaterra, el movimiento de nitratos en el perfil varía con el tipo de suelo. La lixiviación es diferente en

los suelos pesados (arcillosos) que en los suelos livianos (arenosos). En suelos pesados, agrietados y cultivados bien profundos, los nitratos desaparecen del perfil, en la superficie cultivada, por lixiviación o por desnitrificación. En los suelos arenosos claros, donde es ausente la estructura vertical en grietas, los nitratos son llevados por lixiviación a la parte de abajo del perfil.

2.3.2.1 Algunas condiciones del suelo que influyen en la nitrificación:

#### Humedad y aireación

Cualquier aumento de la aireación del suelo aumenta la oxidación y, por lo tanto, la nitrificación. El arado y las operaciones de cultivo favorecen este proceso (3).

En suelos tropicales de Uganda se encontró que la acumulación de nitratos disminuía cuando la humedad era menor que el 10%, mientras que 22-23% fue el valor más favorable para la nitrificación. Los bajos niveles de humedad parecen afectar más a los microorganismos oxidadores de amoníaco (36, 83).

En suelos de clima templado la producción de nitratos puede aumentar hasta un valor de humedad de 40-50% (pF 2,5-2,0). Al ir aumentando la humedad hasta anegamiento, van disminuyendo las cantidades de  $N-NO_3$  (10).

La humedad suficiente, más o menos a capacidad de campo, favorece el proceso. En la práctica, se puede decir que la humedad óptima reconocida en las plantas superiores es también la óptima para la nitrificación. Sin embargo, se ha observado que la nitrificación progresa apreciablemente en el suelo con humedad por debajo del punto de marchitez (34).

Birch (9) dice que la mineralización del N es más eficiente con períodos frecuentes de humedad y sequía que con humedad constante, cuando se adicionan al suelo residuos vegetales que contienen debajo de 1,5% de N, por lo que la mineralización del N puede ser reducida o aumentada.

Van Schreven (90) encontró que más N-mineral fue producido de material vegetal fresco que de material seco. El secamiento de la mezcla residuo-suelo no estimuló la producción de N mineral y esta producción se redujo considerablemente cuando el secado se hizo a 105°C. Secamiento a 35°C no estimuló la mineralización del C de materiales frescos o secos. Observa este autor que la mineralización del C y N en el humus es estimulada por un período seco del suelo.

De acuerdo a Blasco y Cornfield (13), variaciones en el contenido de humedad, en suelos incubados, no sólo afectan la acumulación del N-mineral, en suelos ácidos, neutros o alcalinos, sino que con alto contenido de humedad se inducen pérdidas en el contenido inicial de nitratos de estos suelos. En suelos de reacción básica los nitratos se acumulan en el rango de pF 2,7-1,6 para ser sobrepasados por el amoníaco a pF más bajos; en suelos de reacción neutra los nitratos dominan hasta pF 0 (100% de humedad) mientras que en los suelos anegados aumenta sólo la producción de amoníaco. En suelos ácidos hay un predominio total del amoníaco independientemente del valor de las tensiones.

### Temperatura

La temperatura óptima para la nitrificación está comprendida entre 24 y 32°C (10, 34, 87). Fassbender (53) informa que es alrededor

de 20°C. Mahendrappa et al. (69) agregaron N en forma de  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$  a diferentes suelos del oeste de EE.UU. e incubaron a temperaturas de 20, 25, 35 y 40°C con humedad ajustada a la tensión de 0,3 bares y observaron que en algunos suelos la nitrificación fue mayor a 20 y 25°C que a 35 y 40°C. Sin embargo, en otros suelos fue más rápida a 35°C.

Otros autores (38, 64) dicen que la amonificación es favorecida por temperaturas altas (40 a 60°C), mientras que las temperaturas óptimas para la nitrificación están comprendidas entre 24 y 30°C. Temperaturas más bajas disminuyen la producción de nitratos, más bien debido al pequeño número de microorganismos nitrificantes (en suelos de regiones frías) que a la inactivación de la reacción (54).

Todas estas variaciones en la temperatura vienen a confirmar lo que ha dicho Frederick (55), de que no es al proceso de nitrificación sino los microorganismos que en él intervienen a quienes afecta la temperatura.

#### Reacción del suelo

Un pH neutro es el más favorable para la mineralización del N (42). Sin embargo, la neutralización de suelos ácidos de regiones tropicales y suelos volcánicos no parece aumentar la producción de nitratos, posiblemente por el poco desarrollo de la población zimógena y la formación de humatos, causas que impiden la oxidación del amoníaco (14, 20). Por otra parte se señala (34) que la cal estimula la nitrificación en el suelo. El proceso de oxidación requiere abundancia de bases intercambiables. A esto obedece en parte la débil nitrificación en suelos minerales ácidos y la sensibilidad de los microorganismos a pH bajo.



Blasco y Cornfield (14) añadieron carbonato de calcio a suelos ácidos del Valle del Cauca, Colombia (pH de 4,70 a 6,30) y se incrementó la acumulación de nitratos y disminuyó la de amonio, al mismo tiempo fue mineralizado más N. Estos autores encontraron también que la adición de carbonato de calcio a suelos halomórficos (suelos salinos y salino-sódicos) causó depresión en la amonificación y nitrificación. Esto es explicado por Boon y Laudelont (19) quienes dicen que en suelos alcalinos la oxidación de nitritos está restringida por la disolución de un lugar activo en el sistema enzimático de los microorganismos.

En Costa Rica, según Pineda (75), el encalado de suelos Ando y no Ando, con pH entre 5,0 y 7,4 produjo, en general, un efecto negativo sobre la mineralización del N-orgánico.

#### Materia orgánica y fertilizantes

De acuerdo a Van Schreven (89) la mineralización del C y N, con materiales vegetales añadidos al suelo, es influida no sólo por el contenido de N, C/N y cantidades de estos materiales sino también por el estado fresco o seco en que son añadidos. El material seco retarda la mineralización. Por otra parte, Bornemisza y Pineda (20) encontraron que el tratamiento de suelos derivados de cenizas volcánicas con materia orgánica no tuvo respuesta definida. El encalamiento de estos suelos redujo la velocidad de nitrificación. Cantidades pequeñas de sales, inclusive de los oligoelementos, estimulan la nitrificación (34). Son específicos el cobre, para la formación de la hidroxilamina (4), y el hierro que interviene en el proceso oxidativo (71). Además, la nitrificación no

progresa adecuadamente si los elementos mayores y menores necesarios en la nutrición vegetal presentan algún desbalance; por lo tanto, es ventajoso un buen equilibrio de N, P y K aplicado al suelo (2).

Broadbent, Tyler y Hill (51) encontraron que grandes cantidades de N-amoniacal aplicadas a suelos muy alcalinos disminuyen la nitrificación. Puede ser que bajo estas condiciones el amoniaco sea tóxico a los Nitrobacter pero no afecta a los Nitrosomonas. Por consiguiente, la acumulación de nitritos puede ocurrir en cantidades tóxicas si a suelos con pH muy alcalino se incorporan fertilizantes que contienen amonio (19, 34).

Muchos autores (5, 15, 68, 92) han encontrado que la adición de materiales celulósicos al suelo produce una considerable reducción de la amonificación y nitrificación del N en las primeras semanas. Blasco y Cornfield (15) explican que esto se debe a la fuerte competencia que existe entre las bacterias y los cultivos para tomar el N aprovechable del suelo, lo cual puede ser evitado reduciendo la relación C/N al añadir N al suelo, sobre todo para el caso de la nitrificación.

Cunningham (45), estudiando suelos forestales tropicales de cacao, determinó que el N-amoniacal añadido aumenta el N-fijado en estos suelos y que pueden producir gran cantidad de N-mineral, especialmente en la capa superficial del suelo.

### 3. MATERIALES Y METODOS

#### 3.1 Suelos

Los suelos utilizados en el presente trabajo pertenecen a las series La Margot, Instituto y Reventazón y están localizados en el área del IICA -CTEI al S.E. de la ciudad de Turrialba, en Costa Rica. Esta zona, que es un valle tropical húmedo, tiene una elevación aproximadamente entre 580 y 990 metros sobre el nivel del mar, con temperatura promedio anual de 22,29°C, pluviometría de 2682 mm promedio anual y 87,7% promedio de humedad relativa (1).

Estos suelos tienen una capa de hojarasca todo el año, proveniente de las hojas, flores, mazorcas y tallos que caen de los árboles de cacao. También de las hojas, flores y frutos de los árboles utilizados como sombra. Las propiedades físicas y químicas de los suelos de las series La Margot, Instituto y Reventazón fueron analizadas y estudiadas por Aguirre (1).

##### 3.1.1 Serie La Margot, fase normal

De acuerdo con Dondoli y Torres (49) los suelos de esta serie son de origen lacustre o fluviolacustre. El aluvión es viejo y comprende una terraza situada próxima a los ríos Reventazón y Turrialba. Se encuentran fragmentos rocosos, gravas y piedras en avanzado estado de meteorización.

Según Aguirre (1) pertenecen al orden Inceptisol, suborden Tropepts, gran grupo Dystropepts, subgrupo Typic Dystropepts y a la familia fine, mixed isohyperthermic.

La parte que corresponde a este estudio comprende el área que ocupan los cacaotales situada próxima al perfil modal #10, descrito por Aguirre (1). Esta área es clasificada como serie La Margot, fase normal. El perfil tiene textura franco-arcillosa y densidad aparente ( $\rho_a$ ), en el horizonte perturbado (0-20 cm de profundidad), igual a 1,10 g/cc (1).

El cacao existente en los lugares de la serie donde se tomaron las muestras de suelo pertenece a los clones brasileños 'IAL 42' e 'IAL 44'. También el clon colombiano 'SPA 11'.\* Los marcos de siembra que tienen son 2 x 2,5 metros.

Los árboles que sirven de sombra al cacao pertenecen a la familia leguminosa, género Erythrina. El nombre vulgar más usado en el lugar, para estos árboles de sombra, es "poró".

### 3.1.2 Serie Instituto, fase normal

Los suelos de esta serie son de origen aluvial fluviolacustre más reciente que la serie La Margot (63). Pertenecen al orden Inceptisol, suborden Tropepts, gran grupo Systropepts, subgrupo Typic Dystropepts y familia fine, mixed, isohyperthermic (1).

La parte estudiada de esta serie comprende el área ocupada por los cacaotales con una situación que incluye el perfil #22, descrito por Aguirre (1). Esta área es designada como la serie Instituto, fase normal. El perfil tiene textura franca y densidad aparente, en el horizonte perturbado (0-20 cm de profundidad), de 1,01 g/cc.

---

\* Comunicación personal del Ing. Oscar Esquivel. También para las series Instituto y Reventazón. IICA-CTEI, Turrialba.

Los árboles de cacao existentes donde se tomaron las muestras de suelo son de los híbridos 'UF 296 x CC 9' y 'UF 6,7 x CC 9'. También árboles del clon 'UF 613' de polinización no controlada. Los marcos de siembra que tienen son 3,0 x 3,0 metros.

Los árboles de sombra, al igual que en la serie La Margot, pertenecen a la familia leguminosas, género Erythrina.

### 3.1.3 Serie Reventazón

Los suelos de esta serie se formaron a partir de aluviones recientes y presentan gravas finas angulares que aumentan en cantidad con la profundidad (49). Pertenecen al orden Inceptisol, suborden Tropepts, gran grupo Dystropepts, subgrupo Typic Dystropepts y familia fine, loamy, mixed, isohyperthermic (1).

La zona estudiada de esta serie comprende el área ocupada por los cacaotales, con una situación que incluye el perfil modal #15, descrito por Aguirre (1). Esta área es designada como perteneciente a la serie Reventazón. El perfil tiene textura franca y densidad aparente, en el horizonte perturbado (0-15 cm de profundidad) de 1,27 g/cc.

Los árboles de cacao existentes en los lugares donde se tomaron las muestras de suelos de la serie pertenecen al híbrido 'UF 663 x UF 613' y a los clones 'UF 613' y 'PA 121', ambos de polinización no controlada. Los marcos de siembra que tienen son de 2, x 2,5 metros.

Los árboles de sombra son de la familia leguminosa, género Erythrina.

### 3.2 Procedimiento experimental

Las muestras de cada serie de suelo se secaron al aire y se tamizaron con mallas de 2 mm. Se tomaron porciones de 10 g de suelo que se colocaron en 52 tubos de ensayo; en cada serie de suelo y a cada 10 g se le aplicaron 5 niveles de N-P-K-Mg-S, de acuerdo a un diseño de superficie de respuesta con composición central (ver análisis estadístico más adelante).

También se adicionaron a muestras de 10 g de suelo, en tubo de ensayo, de cada serie de suelo, 0, 0,1 , 0,3 , 0,7 , y 1% de materia orgánica, la cual estaba compuesta por hojas molidas de árboles de cacao y de sombra.

Se incubaron a capacidad de campo (0,33 bares de retención de humedad que corresponden a 40,97 , 47,94 y 49,79% de humedad gravimétrica, en los suelos de las series La Margot, Instituto y Reventazón, respectivamente) en los tubos de ensayo cerrados con tapones de hule, por 5 y 10 semanas, a temperatura de 28-30°C. Conjuntamente se incubaron testigos a los cuales no se les aplicó ningún tratamiento, excepto ponerlos a capacidad de campo con agua destilada. El suministro de aire en los tubos de ensayo se hizo con una mezcla de hidróxido y peróxido de bario en tubitos de 1 cm de diámetro por 5 de largo, según la técnica descrita por Cornfield (44).

Los elementos y niveles que se usaron fueron:

<u>Factores</u>	<u>Niveles o Tratamientos</u>					
N	0	50	100	150	200	Kg/ha
P	0	50	100	150	200	Kg/ha
K	0	25	50	75	100	Kg/ha
Mg	0	25	50	75	100	Kg/ha
S	0	25	50	75	100	Kg/ha

Como fertilizante se utilizaron reactivos de laboratorio.  $\text{NH}_4\text{NO}_3$  como fuente de N;  $\text{NaH}_2\text{PO}_4$  como fuente de P; KCl como fuente de K; MgO como fuente de Mg y  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  como fuente de S.

Las muestras de hojas de cacao y árboles de sombra se recogieron cada 15 días, en costales abiertos de  $1,50 \text{ m}^2$ . Se pusieron tres costales en tres lugares diferentes dentro del área estudiada de cada serie de suelo. Un costal entre un árbol de cacao y uno de sombra, otro entre dos árboles de cacao y el tercero debajo de un árbol de cacao. Las muestras recogidas se pesaron y pusieron a la estufa de aire forzado a  $75^\circ\text{C}$  por 48 horas. Luego se pesaron de nuevo para determinar el peso seco. Se molieron y guardaron en frascos de vidrio. Así fueron conservadas para los análisis e incubaciones que llevaron materia orgánica.

Las muestras procedentes de las incubaciones, se analizaron químicamente para determinar la producción de N- $\text{NH}_3$  y N- $\text{NO}_3$  en 5 y 10 semanas. También se analizaron los testigos incubados sin ningún tratamiento y en los testigos no incubados. En los suelos secos al aire, de las tres series, se analizó el N-total, el N-inorgánico total y el N-intercambiable, y también el carbono para determinar la relación C/N.

De cada serie de suelo se hizo hidrolizado a partir del cual se analizó el N-total, N-NH<sub>3</sub>, N (aminoácidos + hexosaminas) y N (aminoácidos).

En las muestras de hojas molidas se analizaron el N-total y el carbono, para determinar la relación C/N en cada serie de suelo. Además el N-total por mes, desde mayo a octubre, o sea se juntaron las muestras de cada mes y se analizaron por separado.

### 3.3 Métodos analíticos

El N-total tanto de las muestras de suelo como de las hojas se determinó por el método micro-Kjeldahl con las modificaciones propuestas por Bremner (25).

El N-inorgánico total se extrajo con una mezcla de los ácidos clorhídrico y fluorhídrico, previa agitación de la muestra por 24 horas, destilándose la alícuota con borato amortiguado (24).

El N-intercambiable se determinó tratando una muestra de 5 g de suelo con 100 ml de cloruro de calcio. Se destiló con borato amortiguado, de acuerdo a Blasco y Cornfield (12).

El N-orgánico se calculó por diferencia entre el N-total y el N-inorgánico total.

Otras formas de N que se calcularon fueron el N nativo fijo por diferencia entre el N-inorgánico total y el N-intercambiable. Porcentaje de N-inorgánico total y de N-intercambiable respecto al N-total.

El hidrolizado se hizo de acuerdo con el método de Bremner (26). A partir de éste se analizó el N-total, N-NH<sub>3</sub>, N (aminoácidos + hexosaminas) y N (aminoácidos), según lo describe Bremner (26). Además



se determinó hexosaminas por diferencia entre el N (aminoácidos + hexosaminas) y el N (aminoácidos). También el porcentaje de N (aminoácidos) respecto al N-total.

Otros análisis que se hicieron a los suelos de las series estudiadas fueron pH en agua (relación 2:1 agua-suelo), la humedad gravimétrica del suelo seco al aire y también a 0,33 bares (capacidad de campo) para determinar la cantidad de agua por agregar (ml/10 g de suelo) y llevar las muestras hasta capacidad de campo como lo exigían las incubaciones. El método usado para determinar la humedad fue el de la estufa y el método de la membrana de presión para llevar el suelo a capacidad de campo.

Se determinó el C-total tanto en los suelos como en los residuos orgánicos de los cacaotales y árboles de sombra por el método de Walkley-Black (65).

Para medir la producción de N-NH<sub>3</sub> y N-NO<sub>3</sub> provenientes de la mineralización del N en las incubaciones por 5 y 10 semanas, se utilizó la técnica de microdifusión propuesta por Bremner y Shaw (29) que emplea NaCl normal como extractor del N mineralizado. En la técnica se usa óxido de magnesio para liberar N-NH<sub>3</sub> de la alícuota del extracto y sulfato titanoso para liberar N-NO<sub>3</sub>.

### 3.4 Métodos estadísticos

Los datos procedentes de la mineralización y del N-total, tanto del suelo como de las hojas, fueron procesados en una computadora IBM-1130.

Se hizo un análisis de regresión entre el N-total del suelo (variable dependiente y) y el N-total de las hojas (variable independiente x.) según el modelo  $y = \pm b_0 \pm b_1 x_1 \pm b_2 x_1^2$  que resultó con 98,5% de confiabilidad.

Para la mineralización de los suelos incubados con los tratamientos se utilizó un diseño de tratamientos de superficie de respuesta considerando 5 elementos nutritivos o factores (N-P-K-Mg y S) y 5 niveles de abono (tratamientos) o sea un  $2^5 + 2 \times 5 + 10$  (ver Cuadro 5 del Apéndice). Se tomó de Cochran y Cox (40), siendo la parte factorial de 32 combinaciones ( $2^5$ ), la parte axial de 10 combinaciones ( $2 \times 5$ ) y la parte central se repite 10 veces.\* En el Cuadro 2 de Resultados los coeficientes se refieren:  $b_1$  a N,  $b_2$  a P,  $b_3$  a K,  $b_4$  a Mg y  $b_5$  a S.

Se analizó la superficie de respuesta para determinar los puntos óptimos de aplicación de cada elemento para 5 y 10 semanas de incubación en las tres series de suelo.

---

\* G. Páez. Apuntes de clase en el IICA-CTEI, Turrialba, Costa Rica.

#### 4. RESULTADOS

##### 4.1 Estado del nitrógeno en los suelos estudiados

En el Cuadro 1 se presentan los resultados del fraccionamiento del nitrógeno en los suelos estudiados. En las tres series, Instituto, La Margot y Reventazón, el N es, en su mayor parte (97-98%) orgánico. Dentro de esta fracción los aminoácidos representan alrededor del 25% del N-total, también bastante constante para las tres series. En cambio, la concentración de hexosaminas en la serie La Margot es muy baja en relación con los contenidos encontrados en las series Instituto y Reventazón. Las cantidades de N-amídico ( $\text{NH}_4^+$  hidrolizado) son similares a las del N-proteínico.

El N-inorgánico es muy bajo (2-3%) con relación al N-total. Su porcentaje intercambiable varía desde 75,5% en la serie La Margot a 62,6% en la serie Instituto y 54,2% en la serie Reventazón. Con relación al N-mineral es llamativo el relativamente bajo contenido de N- $\text{NH}_3$ . Debido a la acidez de los suelos y la cantidad de residuos vegetales que exhiben los suelos se esperaban cantidades mayores de N- $\text{NH}_3$ . Este resultado podría tener dos interpretaciones: a) Que exista una baja descomposición de compuestos orgánicos nitrogenados, y b) Que el N mineralizado sea aprovechado por los microorganismos y las plantas para su nutrición. En vista de los resultados obtenidos en las incubaciones, la segunda explicación parece la más probable. Por el contrario, la acumulación de N- $\text{NO}_3$ , especialmente en las series La Margot y Reventazón, es mayor de lo esperado. Esto quiere decir que los suelos presentan una considerable actividad quimoautotrófica.

Cuadro 1. Concentración y formas de nitrógeno, contenido de carbono y pH en los suelos estudiados

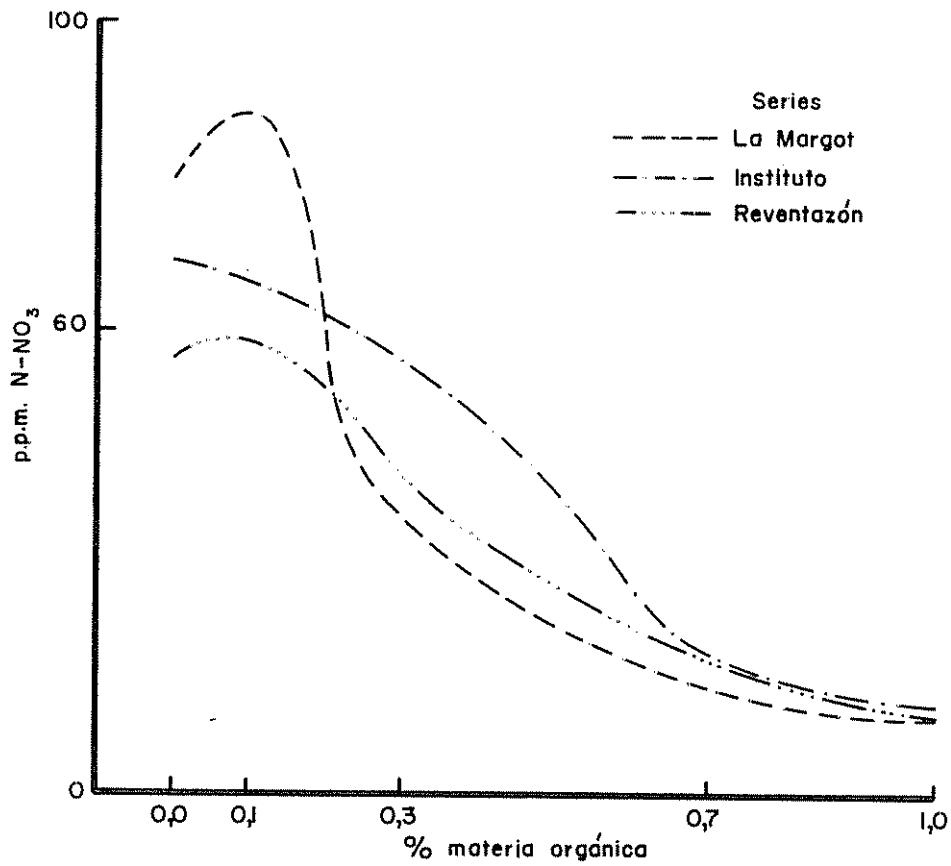
Fracciones del N	Serie de suelo		
	La Margot	Instituto	Reventazón
	Resultados en ppm		
N-total	3563	4317	6848
N-orgánico	3465,4	4213,9	6684,1
N-orgánico, % respecto al N-total	97,3	97,6	97,6
N-inorgánico total	97,6	103,1	163,9
N-inorgánico total, % respecto al N-total	2,7	2,4	2,4
N-NH <sub>4</sub> nativo fijo	23,9	38,6	75,0
N-NH <sub>4</sub> intercambiable	73,7	64,5	88,9
N-NH <sub>4</sub> intercambiable, % respecto al N-inorgánico total	75,5	62,6	54,2
N-NH <sub>4</sub> intercambiable, % respecto al N-total	2,5	1,5	1,3
N-total hidrolizado	3137,5	3353,8	5597,5
N-NH <sub>4</sub> hidrolizado	996,2	1029,3	1574,3
N-proteínico (aminoácidos)	1000,1	1088,4	1754,6
N-proteínico, % respecto al N-total	28,0	25,2	25,6
Hexosaminas (aminoazúcares)	44,1	184,1	176,8
N-NH <sub>3</sub>	26,9	21,5	27,8
N-NO <sub>3</sub>	41,4	17,0	35,0
N-mineral (N-NH <sub>3</sub> + N-NO <sub>3</sub> )	68,3	38,3	62,8
C %	2,7	3,0	6,4
C/N	7,7	6,9	9,4
pH	5,4	5,0	5,6

#### 4.2 Efectos de la adición de materia orgánica en la mineralización del nitrógeno y producción de CO<sub>2</sub>

Los resultados obtenidos se presentan en el Cuadro 6 (Apéndice). En las Figuras 1 y 2 se puede observar cómo la materia orgánica afecta el N-NO<sub>3</sub>, cuya concentración disminuye a medida que aumenta la dosis aplicada de materia orgánica. Este efecto depresivo es similar a las 5 y 10 semanas de incubación de los suelos. Como el N-NO<sub>3</sub> perdido no se recobró en forma de N-NH<sub>3</sub>, quiere decir que hubo un consumo, o inmovilización, de las formas nítricas por parte de los microorganismos.

La adición de materia orgánica afectó irregularmente a la producción de N-NH<sub>3</sub>. Sin embargo, se nota cierta tendencia de disminución en sus concentraciones, de 5 a 10 semanas de incubación, lo cual significa por un lado que la materia orgánica no favoreció el proceso de amonificación y, por otra parte, al ser el N-NH<sub>3</sub> un paso previo a la formación de N-NO<sub>3</sub>, la disminución del amónico, con el transcurso del tiempo de incubación estudiado, está señalando que la inmovilización del N-NO<sub>3</sub> tenderá a ser más drástica.

Como se observa en la Figura 2, la adición de materia orgánica afectó menos la nitrificación de los suelos de cacao pertenecientes a la serie Reventazón. De acuerdo con los resultados obtenidos para la determinación del C (Cuadro 1), el contenido de materia orgánica de la serie Reventazón duplica al de las otras dos series. Muy probablemente los microorganismos, como componentes que son del ecosistema, están adaptados a trabajar en esas condiciones y, por tanto, son menos afectados en su actividad por nuevas adiciones de compuestos orgánicos.



Efecto de la adición de materia orgánica en la nitrificación de los suelos estudiados (5 semanas de incubación)

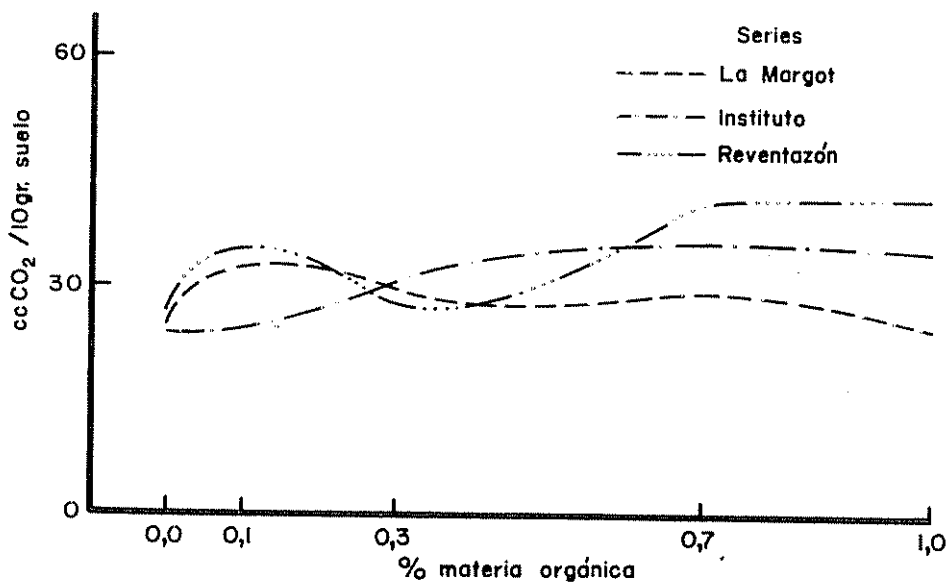
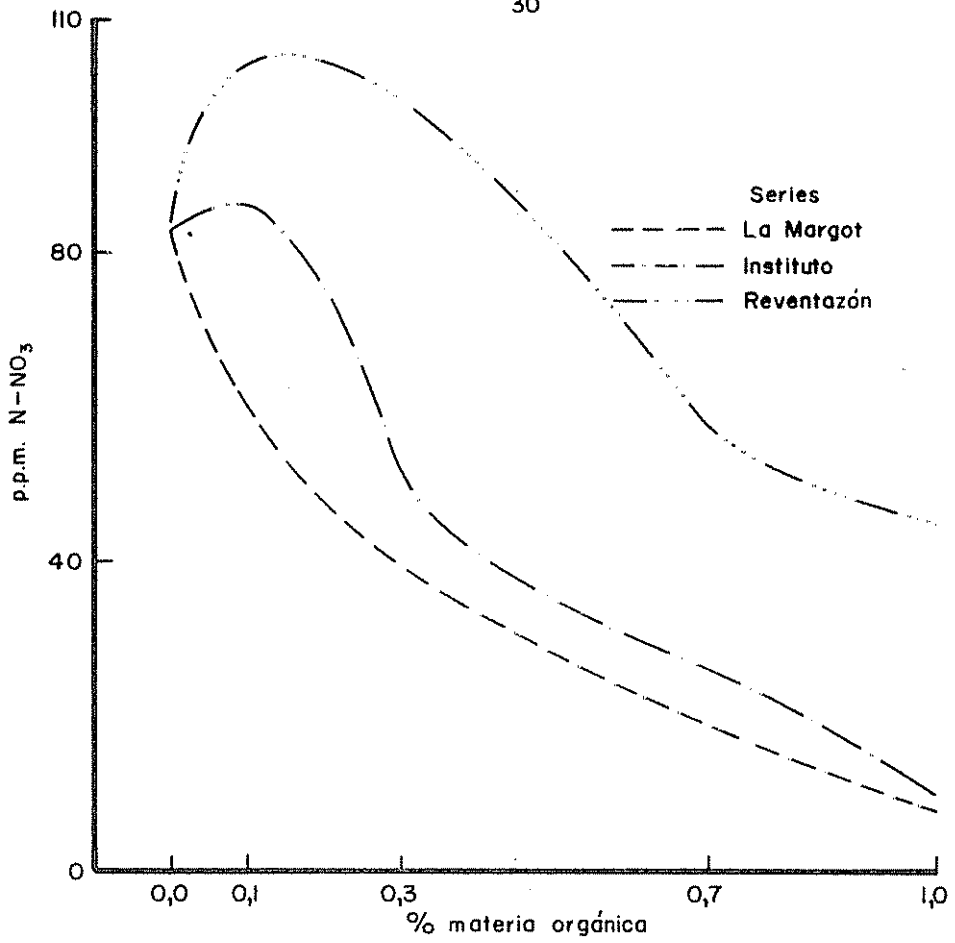


Fig. 1- Efecto de la adición de materia orgánica en la actividad de los microorganismos (5 semanas de incubación)



Efecto de la adición de materia orgánica en la nitrificación de los suelos estudiados (10 semanas de incubación)

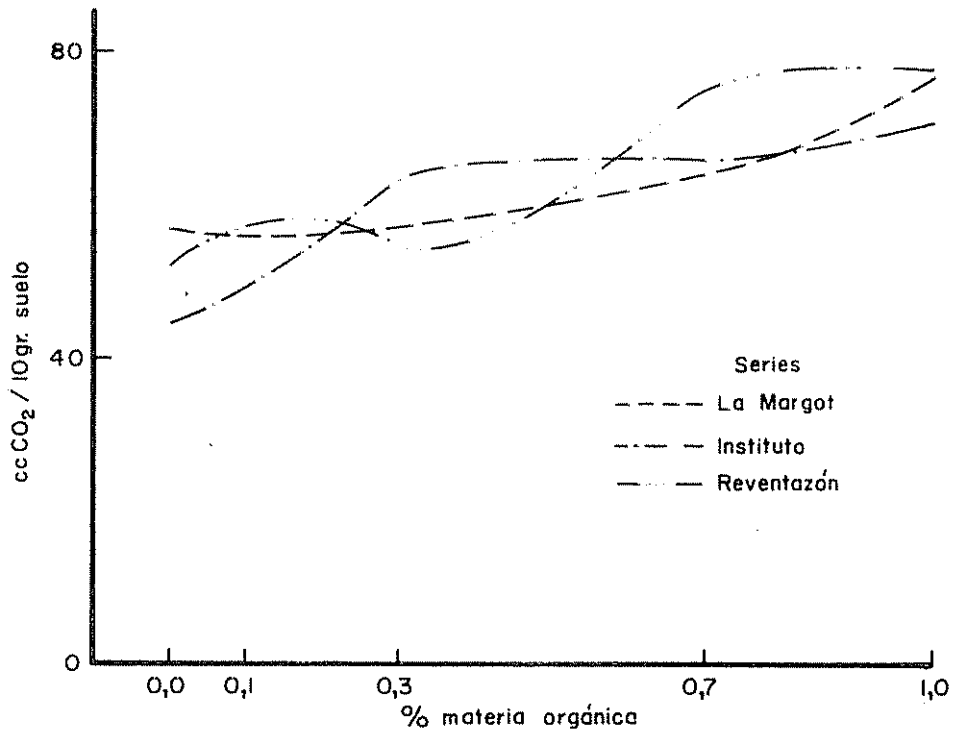


Fig 2- Efecto de la adición de materia orgánica en la actividad de los microorganismos (10 semanas de incubación)

En las mismas Figuras 1 y 2 se puede apreciar el efecto que la materia orgánica causa en la producción de  $\text{CO}_2$ , que tiende a aumentar con el tiempo de incubación y el porcentaje de materia orgánica adicionada. Es un resultado normal ya que los microorganismos tienden a adaptarse con el tiempo a las modificaciones que se introducen en el suelo y a la vez disponen de mayor concentración de material carbonáceo, lo cual explica por qué aumenta la mineralización del carbono.

#### 4.3 Nitrógeno y carbono adicionado por los residuos vegetales y su relación con el N-total del suelo

Los resultados obtenidos aparecen en los Cuadros 8 y 9 del Apéndice. El contenido de N en los residuos vegetales del cacao y su sombrío es fluctuante con el tiempo, encontrándose la mayor acumulación en el período junio-agosto, mientras que el mínimo, dentro del período de 6 meses estudiado, cae en la época setiembre-octubre (Figura 4). Según se observa en la Figura 3, debido a que el coeficiente de regresión lineal es negativo ( $b_1 = -6,947$ ), a medida que los suelos reciben más materia orgánica con contenidos de N menores de 1,8%, disminuye relativamente la concentración de N-total de los suelos. Si este porcentaje de N en los residuos vegetales es mayor, como el coeficiente cuadrático es positivo ( $b_{11} = 1,88$ ) la concentración relativa de N-total en los suelos tiende a aumentar.

El contenido de C de los residuos vegetales es más constante que el del N, con un valor generalizado de 37,5%. Los datos encontrados demuestran que a medida que aumenta la concentración de N en los



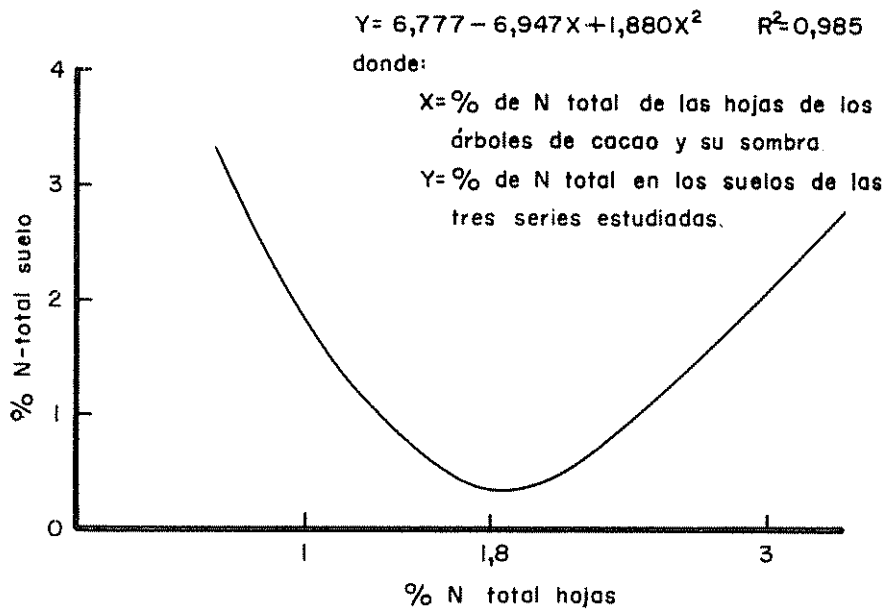


Fig. 3— Concentración de N total en los residuos y su relación con el N total del suelo

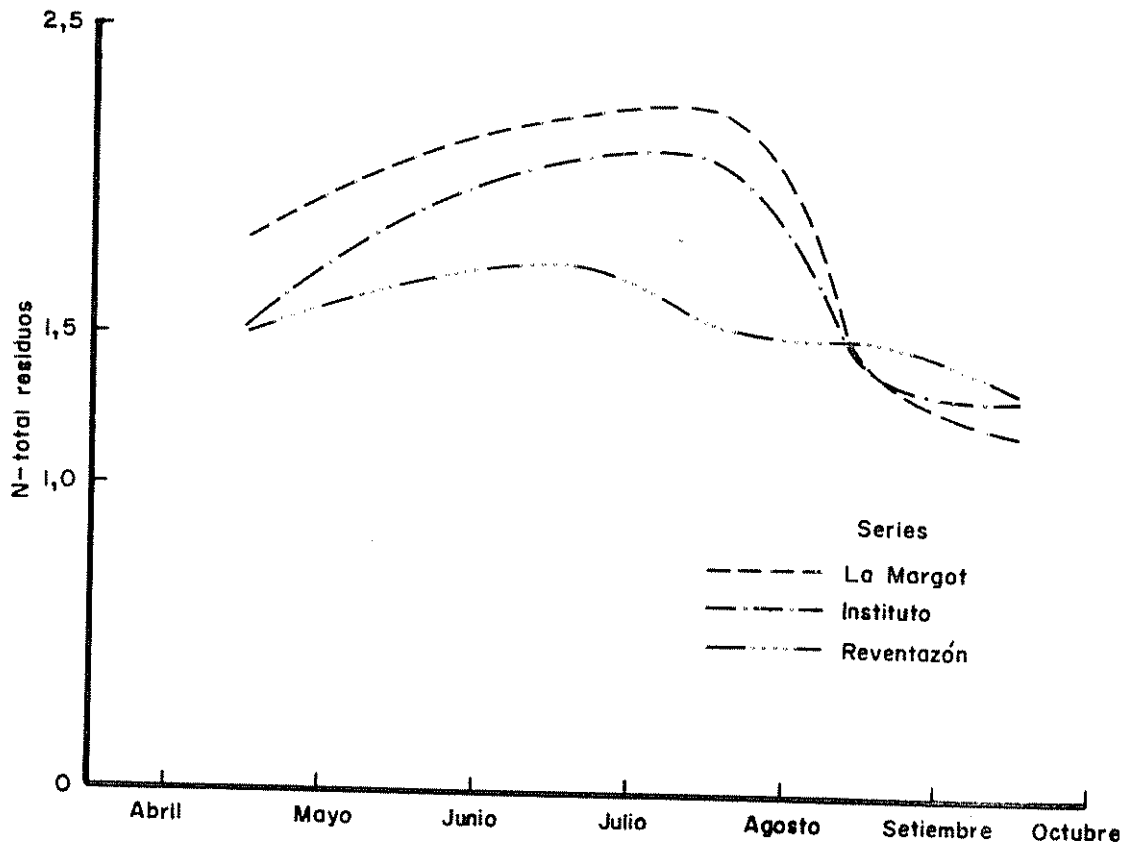


Fig 4— Concentración de N-total de los residuos determinados cada mes.

residuos vegetales disminuye el porcentaje de C. De ahí que la relación C/N sea más estrecha en la serie La Margot que en las otras dos series. Además las relaciones C/N encontradas indican que, en los primeros períodos de incubación, las mayores probabilidades de mineralización del N corresponden a la serie Reventazón, mientras que la mineralización es más favorecida en la serie La Margot, confirmando así los resultados obtenidos al incubar las muestras testigos (sin tratamientos) durante 5 semanas (Cuadro 6).

En el Cuadro 8 del Apéndice se anotan los pesos secos del material vegetal recogido durante los 6 meses del experimento. Estos datos ayudan a calcular el N y C total recibidos por hectárea de cacao y sombrero, durante un período de tiempo.

#### 4.4 Producción de $\text{NH}_3$ y $\text{NO}_3$ en las series de suelos estudiadas

En los Cuadros 10, 11 y 12 del Apéndice se indican los resultados obtenidos de la producción de N- $\text{NH}_3$  y N- $\text{NO}_3$  en las series de suelos estudiadas, para períodos de incubación de 5 y 10 semanas.

Los resultados demuestran que la mineralización del N es la reacción dominante en los suelos de cacao. Para un total de 156 reacciones observadas, solamente en tres de ellas, tratamientos 2 y 4 en la serie La Margot y tratamiento 6 en la serie Reventazón, se presentó el fenómeno de inmovilización al final del período de las 10 semanas de incubación.

En general la producción de N- $\text{NH}_3$  tendió a disminuir de las 5 a las 10 semanas de incubación, mientras lo contrario sucedió en la

producción de N-NO<sub>3</sub>. Como en conjunto el N-mineralizado fue mayor al final del período de incubación, se deduce que el proceso de nitrificación fue mucho más eficiente que el de amonificación.

Teniendo en cuenta que son suelos ácidos, es sorprendente la alta cantidad de nitratos producidos. Es evidente que la reacción de oxidación de amoníaco a nitratos es muy activa, lo cual lleva a decir que las reacciones quimioautotróficas del ecosistema estudiado son bastante **completas**.

#### 4.5 Resultados estadísticos en la mineralización del nitrógeno, en los suelos estudiados

##### 4.5.1 Efecto de fertilizantes en la producción de N-NH<sub>3</sub> en las tres series de suelo y los dos períodos de incubación

Los resultados obtenidos en el experimento se presentan en el Cuadro 2.

Al aplicar N, los suelos de la serie La Margot, en 5 semanas de incubación, tienen un incremento inicial positivo más o menos grande ( $b_1 = 0,169$ ) en la producción de N-NH<sub>3</sub> que luego sigue aumentando con menor intensidad ( $b_{11} = 0,0002$ ). Sin embargo, a las 10 semanas el incremento inicial es positivo con la misma intensidad que a las 5 semanas ( $b_1 = 0,173$ ) pero luego declina lentamente hasta ser negativo en la forma cuadrática ( $b_{11} = -0,0004$ ). Cuando se pone P los resultados son un poco diferentes. En 5 semanas de incubación ocurre un incremento negativo ( $b_2 = -0,123$ ) que sube y llega a ser débilmente positivo en la forma cuadrática ( $b_{22} = 0,0002$ ). A las 10 semanas el coeficiente lineal es positivo ( $b_2 = 0,02$ ) aunque con menor intensidad que a las 5 semanas pero continúa aumentando débilmente en la forma cuadrática ( $b_{22} = 0,0004$ ).

Cuadro 2. SUPERFICIE DE RESPUESTA DE N-NH<sub>3</sub> Y N-NO<sub>3</sub> COMO FUNCION DE N, P, K, Mg Y S, EN 5 Y 10 SEMANAS DE INCUBACION

$$\text{Modelo matemático: } y_i = b_0 + \sum_{i=1}^5 b_i x_i + \sum_{i=1}^5 b_{ii} x_i^2 + \sum_{i < j} b_{ij} x_i x_j$$

Serie de suelo	Tiempo de incubación	Forma de N-mineral	Coeficientes										
			b <sub>0</sub>	b <sub>1</sub>	b <sub>2</sub>	b <sub>3</sub>	b <sub>4</sub>	b <sub>5</sub>	b <sub>11</sub>	b <sub>22</sub>	b <sub>33</sub>	b <sub>44</sub>	b <sub>55</sub>
La Margot Instituto Reventazón	5 sem.	N-NH <sub>3</sub>	8,133	0,169	-0,123	0,363	-0,196	-0,137	0,0002	0,0002	-0,001	-0,0005	-0,002
			-33,255	0,427	0,281	0,465	0,508	0,043	-0,0003	-0,001	-0,003	-0,006	0,0004
			19,743	0,219	0,159	0,414	-0,704	0,468	-0,001	-0,0002	-0,004	0,002	-0,003
La Margot Instituto Reventazón	5 sem.	N-NO <sub>3</sub>	179,693	-0,848	-0,037	-1,485	-1,477	-1,060	0,002	-0,0001	0,004	-0,003	0,014
			111,318	-0,159	-0,966	-0,209	-0,535	0,232	-0,0002	0,002	-0,001	0,008	-0,006
			3,514	0,253	-0,090	0,800	-0,006	-0,715	0,001	-0,001	-0,003	0,010	0,001
La Margot Instituto Reventazón	10 sem.	N-NH <sub>3</sub>	-0,732	0,173	0,021	-0,086	0,278	0,075	-0,0004	0,0004	-0,001	-0,001	-0,002
			10,658	0,024	0,034	0,112	-0,030	-0,105	-0,00001	0,0003	-0,0002	-0,0002	0,0005
			24,714	0,064	-0,063	-0,171	-0,100	-0,155	0,00003	0,0002	0,001	0,001	0,0001
La Margot Instituto Reventazón	10 sem.	N-NO <sub>3</sub>	89,933	-0,584	0,163	-0,192	0,726	0,792	0,001	0,0002	0,006	-0,004	-0,001
			120,293	0,492	-0,311	-0,334	-0,088	-0,408	0,0001	0,001	0,003	-0,004	-0,0004
			25,090	0,951	0,228	-0,583	1,106	0,718	-0,001	0,001	0,003	-0,009	-0,0002
Serie de suelo	Tiempo de incubación	Forma de N-mineral	Coeficientes										
			b <sub>12</sub>	b <sub>13</sub>	b <sub>14</sub>	b <sub>15</sub>	b <sub>23</sub>	b <sub>24</sub>	b <sub>25</sub>	b <sub>34</sub>	b <sub>35</sub>	b <sub>45</sub>	R <sup>2</sup>
La Margot Instituto Reventazón	5 sem.	N-NH <sub>3</sub>	0,001	-0,002	0,001	-0,0003	-0,001	-0,0003	0,002	0,001	-0,001	0,003	0,670
			-0,0005	0,000	-0,001	-0,001	-0,0002	0,0005	-0,001	-0,003	-0,002	0,004	0,725
			0,0001	-0,001	0,002	-0,001	-0,002	0,0001	-0,002	0,004	0,0004	0,002	0,442
La Margot Instituto Reventazón	5 sem.	N-NO <sub>3</sub>	-0,002	0,005	0,009	0,001	0,003	0,003	0,002	0,017	-0,008	-0,002	0,486
			0,002	-0,001	0,002	0,002	0,003	0,0000	0,003	0,002	0,003	-0,006	0,280
			0,001	0,0001	-0,006	-0,002	0,002	-0,0001	0,003	-0,014	0,001	0,004	0,431
La Margot Instituto Reventazón	10 sem.	N-NH <sub>3</sub>	-0,001	0,003	-0,003	0,002	-0,002	0,003	-0,002	-0,002	0,007	-0,004	0,544
			-0,0004	0,0004	-0,0002	0,0005	-0,0008	-0,0001	-0,0004	0,0004	-0,002	0,003	0,508
			-0,0002	-0,0002	-0,0005	-0,0002	0,0001	0,0002	0,001	0,001	0,001	0,0002	0,511
La Margot Instituto Reventazón	10 sem.	N-NO <sub>3</sub>	0,002	0,002	0,005	-0,001	0,0002	-0,006	-0,0002	0,002	-0,012	-0,002	0,395
			-0,0003	-0,002	-0,0002	-0,0007	-0,001	0,001	0,001	0,001	0,003	0,004	0,827
			-0,001	-0,001	-0,0002	-0,004	-0,001	-0,002	-0,002	0,006	0,004	-0,006	0,759

Con K ocurre un fuerte incremento inicial positivo, en 5 semanas ( $b_3 = 0,363$ ) que desciende hasta llegar a ser negativo ( $b_{33} = -0,001$ ). Si es en 10 semanas se presenta un efecto enteramente negativo ( $b_3 = -0,08$  y  $b_{33} = -0,001$ ). El Mg, a las 5 semanas, se comporta parecido al K en 10 semanas, siendo el efecto negativo aún mayor ( $b_4 = -0,196$  y  $b_{44} = -0,0005$ ). A las 10 semanas ocurre un incremento positivo ( $b_4 = 0,278$ ) que llega a ser negativo en la forma cuadrática ( $b_{44} = -0,001$ ). Cuando el elemento aplicado es S, a las 5 semanas hay un efecto detrimental tanto en la forma lineal como en la cuadrática ( $b_5 = -0,137$  y  $b_{55} = -0,002$ ) mientras que a las 10 semanas ocurre un efecto inicial aumentativo ( $b_5 = 0,075$ ) que luego se vuelve negativo ( $b_{55} = -0,002$ ).

En la serie Instituto, al aplicar N, la producción de N-NH<sub>3</sub> aumenta, a las 5 semanas de incubación ( $b_1 = 0,427$ ) y luego tiene un descenso en la forma cuadrática ( $b_{11} = -0,0003$ ). A las 10 semanas ocurre exactamente igual que a las 5 ( $b_1 = 0,024$  y  $b_{11} = -0,00001$ ).

El efecto del P es muy parecido al del N salvo a las 10 semanas de incubación, en que el incremento inicial es positivo ( $b_2 = 0,034$ ) y así continúa aunque de manera menos acentuada ( $b_{22} = 0,0003$ ).

El efecto del K es prácticamente igual que el del N, tanto en 5 como en 10 semanas de incubación (ver Cuadro 2).

El Mg tiene un incremento positivo ( $b_4 = 0,508$ ) a las 5 semanas, que pasa a ser negativo en la forma cuadrática ( $b_{44} = -0,006$ ). Sin embargo, a las 10 semanas la influencia es totalmente negativa ( $b_4 = -0,030$  y  $b_{44} = -0,0002$ ).

En el S se observa algo diferente. A las 5 semanas de incubación su efecto es totalmente positivo ( $b_5 = 0,043$  y  $b_{55} = 0,0004$ ) y a las 10 semanas primeramente disminuye ( $b_5 = -0,105$ ) y luego aumenta positivamente ( $b_{55} = 0,0005$ ).

Para la serie Reventazón, el N en 5 semanas produce un incremento positivo ( $b_1 = 0,219$ ) que se transforma en negativo en el coeficiente cuadrático ( $b_{11} = -0,001$ ). En 10 semanas ocurre un aumento que se mantiene ( $b_1 = 0,064$  y  $b_{11} = 0,00003$ ) aunque ya casi comenzando a declinar.

En el P, la producción de  $N-NH_3$  en 5 semanas, es similar a la del N, pero a las 10 semanas se presenta una pérdida ( $b_2 = -0,063$ ) que desaparece para convertirse en ganancia en la forma cuadrática ( $b_{22} = 0,0002$ ).

Con el K a las 5 semanas el aumento inicial es fuertemente positivo ( $b_3 = 0,414$ ) pero se hace negativo en la forma cuadrática ( $b_{33} = -0,004$ ); sin embargo, a las 10 semanas ocurre lo contrario, o sea que la iniciación es negativa ( $b_3 = -0,171$ ) y pasa a ser positiva en la parte cuadrática ( $b_{33} = 0,001$ ).

El efecto del Mg es parecido a las 5 y 10 semanas de incubación, o sea que hay un incremento negativo que disminuye hasta llegar a ser positivo (ver Cuadro 2).

El S tiene un efecto positivo ( $b_5 = 0,468$ ) en 5 semanas de incubación, que pasa a ser negativo en la parte cuadrática ( $b_{55} = -0,003$ ). Sin embargo, a las 10 semanas es lo contrario. El efecto inicial es negativo ( $b_5 = -0,155$ ) para pasar después a positivo ( $b_{55} = 0,0001$ ).

En general se observa un efecto favorable del N más notable que los otros elementos para la producción de  $N-NH_3$ , tanto en 5 como en 10 semanas de incubación de las tres series de suelos estudiadas.

#### 4.5.2 Efecto de fertilizantes en la producción de $N-NO_3$ en las tres series estudiadas y los dos períodos de incubación

Estos resultados también se presentan en el Cuadro 2. De acuerdo con éstos, en los suelos de la serie La Margot al aplicar N se produce una baja en la formación de  $N-NO_3$  tanto en 5 como en 10 semanas. Los coeficientes lineales son negativos ( $b_1$ , 5 semanas = -0,848 y  $b_1$ , 10 semanas = -0,584) aunque llegan a ser positivos, pero de una manera muy pequeña, en la forma cuadrática ( $b_{11}$ , 5 semanas = 0,002 y  $b_{11}$ , 10 semanas = 0,001).

El P, en la misma serie de suelo, a las 5 semanas tiene un efecto negativo que se mantiene al aumentar la dosis ( $b_2 = -0,037$  y  $b_{22} = -0,0001$ ). Sin embargo, a las 10 semanas el efecto inicial es positivo ( $b_1 = 0,163$ ) y se mantiene así en la forma cuadrática ( $b_{22} = 0,0002$ ).

Con el K, a las 5 semanas ocurre una fuerte disminución inicial ( $b_3 = -1,485$ ) pero en la parte cuadrática la disminución se hace menor e inclusive el coeficiente llega a ser positivo ( $b_{33} = 0,004$ ).

Cuando el elemento aplicado es S origina un fuerte incremento negativo a las 5 semanas ( $b_5 = -1,060$ ) que disminuye y llega a ser positivo en la parte cuadrática ( $b_{55} = 0,014$ ). En 10 semanas de incubación el incremento inicial es positivo ( $b_5 = 0,792$ ) pero pasa a ser negativo en la parte cuadrática ( $b_{55} = -0,001$ ).



Para la serie Instituto, el N en 5 semanas de incubación produce un incremento negativo ( $b_1 = -0,159$ ) que se mantiene en la forma cuadrática ( $b_{11} = -0,0002$ ). A las 10 semanas ocurre lo contrario. El incremento inicial es positivo ( $b_1 = 0,492$ ) y se mantiene en la parte cuadrática ( $b_{11} = 0,0001$ ).

Con el P se produce un incremento negativo a las 5 semanas ( $b_2 = -0,966$ ) que pasa a ser positivo en la parte cuadrática ( $b_{22} = 0,002$ ). Lo mismo sucede a las 10 semanas de incubación ( $b_2 = -0,311$  y  $b_{22} = 0,001$ ).

Al aplicar K ocurre, en 5 semanas, una disminución inicial ( $b_3 = -0,209$ ) que se continúa en la parte cuadrática ( $b_{33} = -0,001$ ). A las 10 semanas también ocurre una disminución inicial ( $b_3 = -0,334$ ). En la parte cuadrática ocurre un aumento ( $b_{33} = 0,003$ ).

Con el Mg ocurre un descenso a las 5 semanas ( $b_4 = -0,535$ ) pero se transforma en aumento ( $b_{44} = 0,008$ ). A las 10 semanas el descenso inicial es patente ( $b_4 = -0,088$ ) y se mantiene en la parte cuadrática ( $b_{44} = -0,004$ ).

El S, a las 5 semanas, produce un aumento en la producción de nitratos ( $b_5 = 0,232$ ) pero disminuye hasta llegar a negativo en la parte cuadrática ( $b_{55} = -0,006$ ). En 10 semanas hay pérdida completa ( $b_5 = -0,408$  y  $b_{55} = -0,0004$ ).

En la serie Reventazón, el N tiene un efecto muy favorable en la producción de nitratos. A las 5 semanas los dos coeficientes son positivos ( $b_1 = 0,253$  y  $b_{11} = 0,001$ ). A las 10 semanas el incremento inicial es fuertemente positivo ( $b_1 = 0,951$ ); sin embargo, pasa a ser negativo en la parte cuadrática ( $b_{11} = -0,001$ ).

El P produce un efecto detrimental en 5 semanas ( $b_2 = -0,090$  y  $b_{22} = -0,001$ ), no siendo así a las 10 semanas donde el efecto es favorable pues los dos coeficientes son positivos ( $b_2 = 0,228$  y  $b_{22} = -0,001$ ).

Al aplicar K ocurre un incremento positivo a las 5 semanas ( $b_3 = 0,800$ ) que pasa a ser negativo en la parte cuadrática ( $b_{33} = -0,003$ ). En 10 semanas ocurre lo contrario. El incremento inicial es negativo ( $b_3 = -0,583$ ) y pasa a ser positivo ( $b_{33} = 0,003$ ) en la parte cuadrática.

Con el Mg se produce un incremento negativo a las 5 semanas de incubación ( $b_4 = -0,006$ ) que pasa a ser positivo en la parte cuadrática ( $b_{44} = 0,010$ ). Lo contrario ocurre a las 10 semanas; el coeficiente lineal es fuertemente positivo ( $b_4 = 1,106$ ) y el cuadrático es negativo ( $b_{44} = -0,009$ ).

El S tiene, en 5 semanas, de incubación, un efecto inicial negativo ( $b_5 = -0,715$ ) que pasa a ser positivo en la parte cuadrática ( $b_{55} = 0,001$ ). A las 10 semanas ocurre lo contrario. El efecto inicial es positivo ( $b_5 = 0,718$ ) y llega a ser negativo en la parte cuadrática ( $b_{55} = -0,0002$ ).

Nuevamente es notable el efecto favorable del N en la producción de  $N\text{-NO}_3$ , tanto en 5 como en 10 semanas, excepto en la serie Instituto en que a las 5 semanas el efecto no es favorable ( $b_1 = -0,159$  y  $b_{11} = -0,0002$ ). El efecto positivo es más acentuado en los suelos de la serie Reventazón donde los coeficientes lineales y cuadráticos son en su mayoría positivos. Esto indudablemente tiene que ver con la producción de amoníaco pues tanto en 5 como en 10 semanas la aplicación de N favorece la formación de este compuesto (ver Cuadro 2).

#### 4.5.3 Necesidad de N, P, K, Mg y S (valores estimados) según la serie de suelo y el período de incubación

##### 4.5.3.1 Producción de N-NH<sub>3</sub> en 5 y 10 semanas de incubación para las tres series de suelo

En el Cuadro 3 se presentan los resultados de la necesidad de N, P, K, Mg y S (valores estimados) para la producción de N-NH<sub>3</sub> en las tres series de suelos estudiadas, para 5 y 10 semanas de incubación.

En 5 semanas los suelos de la serie La Margot no tienen necesidad de P, Mg y S para producir amoníaco, sólo es necesario N (200 Kg/ha) y K (100 Kg/ha), mientras que la serie Instituto tiene necesidad de todos los elementos. En la serie Reventazón sólo no es innecesario el Mg.

A las 10 semanas la serie Reventazón nada más necesita N (200 Kg/ha) para la máxima producción de N-NH<sub>3</sub>. La serie Instituto necesita de N, P y K y la serie La Margot N, P, Mg y S.

Los suelos de la serie Reventazón son los que requieren menor cantidad de N (78,5 Kg/ha) en 5 semanas de incubación, mientras que la serie La Margot es la menos exigente a las 10 semanas. La serie Reventazón es la que exige menor cantidad de abono total, tanto en 5 como en 10 semanas de incubación. Esto es notable porque estos suelos son los que reciben más materia orgánica de los árboles de cacao y su sombrío, o sea que siendo los suelos que tienen más materia orgánica, necesitan menor cantidad de abono para producir N-mineralizado en forma de N-NH<sub>3</sub> en 5 semanas de incubación.

Cuadro 3. Necesidad de N, P, K, Mg y S (valores estimados) para la producción de N-NH<sub>3</sub> (amonificación) en los suelos estudiados

Serie de suelo	Período de incubación	Forma de N-mineral	Kg/ha				
			N	P	K	Mg	S
La Margot			200	0	100	0	0
Instituto	5 semanas	N-NH <sub>3</sub>	200	200	27,3	32,0	100
Reventazón			78,5	71,3	26,3	0	42,9
La Margot			102,1	200	0	25,7	18,5
Instituto	10 semanas	N-NH <sub>3</sub>	117,9	200	96,6	0	0
Reventazón			200	0	0	0	0

Cuadro 4. Necesidad de N, P, K, Mg y S (valores estimados) para la producción de N-NO<sub>3</sub> (nitrificación) en los suelos estudiados

Serie de suelo	Período de incubación	Forma de N-mineral	Kg/ha				
			N	P	K	Mg	S
La Margot			0	0	0	0	0
Instituto	5 semanas	N-NO <sub>3</sub>	0	0	0	0	21,1
Reventazón			200	0	100	0	0
La Margot			0	200	0	12,7	100
Instituto	10 semanas	N-NO <sub>3</sub>	200	0	0	0	0
Reventazón			118,5	200	0	100	100

#### 4.5.3.2 Producción de N-NO<sub>3</sub> en 5 y 10 semanas de incubación para las tres series de suelos estudiadas

Estos resultados se presentan en el Cuadro 4. Se puede notar aquí que a las 5 semanas de incubación los suelos de la serie La Margot no tienen necesidad de ninguno de los elementos, mientras que los suelos de la serie Instituto sólo necesitan S en cantidades pequeñas (21,1 Kg/ha). La serie Reventazón necesita de N y K en las cantidades máximas aplicadas (N = 200 Kg/ha y K = 100 Kg/ha).

Al completar las 10 semanas de incubación, se observa en el Cuadro 4 que los suelos de la serie Instituto son los que requieren menor cantidad de fertilizante para producir nitratos (200 Kg/ha de N). Los suelos de La Margot no tienen necesidad ni de N ni de K, mientras que los de la serie Reventazón necesitan de todos los elementos excepto del K.

En el Cuadro 3 se puede ver que los suelos de la serie Reventazón son los que necesitan menor cantidad de abono para producir amoníaco; sin embargo, éstos son los que requieren mayor cantidad de abono para la producción de N-NO<sub>3</sub>, tanto en 5 como en 10 semanas de incubación.

También es notable el caso contrario que sucede en la serie Instituto, o sea que estos suelos necesitan la mayor cantidad de abonos (en comparación con las otras dos series) para producir N-NH<sub>3</sub> en 5 y 10 semanas de incubación.

Los suelos de la serie La Margot son un poco exigentes para producir N-NH<sub>3</sub>, mientras que para la producción de N-NO<sub>3</sub> sus exigencias son mucho menores en 5 semanas, aunque requieren más en 10 semanas de incubación. Es fácilmente notable en los Cuadros 3 y 4 que en

conjunto las tres series exigen menor cantidad de abono para la producción de  $N\text{-NO}_3$  que para la producción de  $N\text{-NH}_3$ , es decir que el abonamiento tiende más bien a favorecer, en general, al proceso de amonificación que al de nitrificación, en 5 y 10 semanas de incubación, en las tres series de suelos estudiadas.

## 5. DISCUSION

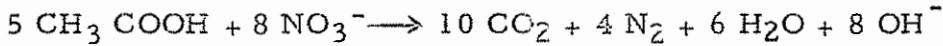
El N de los suelos estudiados es casi en su totalidad de origen orgánico, concordando así con lo reportado recientemente por Suárez (86). En esto parece influir notablemente el hecho de que el N-orgánico es continuamente adicionado por los residuos vegetales del cacao y su sombrío. Al respecto Hardy (62) dice que 50 árboles de Erythrina glauca producen 20 libras de N por acre (medido en cacaotales de Trinidad). En la composición del N-orgánico entran por igual el N-amidico y los aminoácidos pero se debe hacer notar que, comparativamente, la materia orgánica procedente del cacao y su sombrío tiene en su composición menor cantidad de aminoácidos que la encontrada por Suárez (86) para la materia orgánica procedente de bosques, pradera y cultivo (café), aunque su porcentaje se encuentra dentro del rango (20-40% del N-total) aceptado comúnmente en los suelos (23, 41, 69). Los aminoazúcares están muy por debajo del promedio señalado para los suelos de zona templada (28, 52, 84). Por el momento no se sabe a qué obedece esta diferencia, pero desde que se encontró que las hexosaminas son casi totalmente de origen microbial (27, 78), una posibilidad es que la constitución protoplasmática de los microorganismos de esta región sea más baja en aminoazúcares que los de zonas templadas. Las hexosaminas van ligadas a los lípidos para formar las paredes celulares (33) y no parece ilógico pensar que el alto metabolismo que se presenta en los suelos tropicales contribuya a disminuir el contenido total de lipolisacáridos celulares.

Dentro de la fracción inorgánica del N, el contenido de N-NO<sub>3</sub> de estos suelos, especialmente en las series Reventazón y La Margot, demuestra la existencia de una vigorosa población quimioautotrófica capaz de oxidar y, por tanto, de no dejar acumular, las formas amoniacales. Por otra parte, la permanente adición de residuos vegetales posibilita la retención del N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup> por la materia orgánica para formar amidas o compuestos quinoideos, lo cual explicaría las bajas cantidades de N-inorgánico fijo de estos suelos. El N-intercambiable está constituido en su mayor parte por N-mineral (N-NH<sub>3</sub> + N-NO<sub>3</sub>) y el resto se puede atribuir al N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup> derivado bien de la fracción inorgánica o del N-orgánico hidrolizado o reducido en los suelos a la forma de NH<sub>4</sub><sup>+</sup>.

La adición en dosis crecientes de materia orgánica tendió a aumentar la actividad microbial del suelo y disminuyó progresivamente la nitrificación, lo cual constituye una reacción típica de inmovilización. Cuando se añade materia orgánica al suelo se coloca a disposición de los microorganismos una mayor cantidad de energía, lo cual estimula el crecimiento de la población que requiere más O<sub>2</sub> para su respiración y más nutrientes para la multiplicación celular. Todo este trabajo se refleja en un aumento de la actividad  $\rho$ , lo que es lo mismo, de CO<sub>2</sub>, pero la adición de más materia orgánica también provoca la ampliación de la relación C/N que, como ha sido demostrado (93, 94, 95, 96), produce la inmovilización del N, reacción que responde a las necesidades de mayor cantidad de nutrientes para la nueva población zimógena originada como respuesta a la mayor disponibilidad de substrato carbonáceo.



Ocurre además que el aumento de población conlleva un mayor consumo de oxígeno conducente, como señalan Bremner y Shaw (30), a la desnitrificación. En términos bioquímicos se produce una reacción de metafermentación del tipo, por ejemplo:



en la cual la materia orgánica adicionada actúa como donador de electrones y el  $\text{NO}_3^-$  como aceptador de electrones, formándose como productos otros compuestos orgánicos o  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$  y compuestos inorgánicos reducidos. Esta reacción, como dice Delwiche (47), es una reducción desasimilativa del nitrógeno.

Finalmente cabe anotar que la disminución de los niveles de  $\text{NO}_3^-$  también se debe a que un exceso de carbohidratos inhibe la acción de la enzima proteinasa (39). Por lo tanto, si no hay transformación de proteínas, que es la principal fuente nitrogenada, los procesos de amonificación y nitrificación funcionan en forma restringida.

El comportamiento observado en este experimento es acorde con el reportado para otros suelos (15, 44, 67, 68), lo cual indica que el comportamiento de los microorganismos quimoautotróficos actúa similarmente en cualquier suelo, en el sentido de que si se aumentan los niveles de materia orgánica de un ecosistema dado, se producen siempre reacciones de inmovilización y de metafermentación.

El N-total del suelo disminuye comparativamente a la materia orgánica de los residuos, cuando éstos contienen menos de 1,8% de N en su composición, explicable porque como el contenido de C de esos residuos es aproximadamente constante (37,5%), la relación C/N se amplía.

El valor 1,8% de N en los residuos es similar al reportado por Van Schreven (89) como punto determinante (1,5% de N) de las reacciones de inmovilización, que se presentarán cuando el contenido de N de los residuos vegetales sea inferior a 1,5%, o de mineralización que será dominante cuando los residuos den porcentajes de N superior a 1,5%.

La transformación de los compuestos orgánicos nitrogenados de los suelos de cacao estudiados se puede calificar de satisfactoria, lo cual impone que, además de los microorganismos heterotróficos, esos suelos contienen una población quimioautotrófica activa, tanto en la oxidación de  $\text{NH}_3^-$  a  $\text{NO}_2^-$  (Nitrosomonas, Nitrosococcus, etc.) como en la oxidación de  $\text{NO}_2^-$  a  $\text{NO}_3^-$  (Nitrobacter, Nitrocystis).

En el total del período de incubación la transformación de N- $\text{NH}_3$  a N- $\text{NO}_3$  es mucho más activa que la de compuestos orgánicos nitrogenados a N- $\text{NH}_3$ , lo cual está señalando que el proceso de la nitrificación supera al de amonificación. Solamente en el suelo de cacao de la serie Reventazón y en las 5 primeras semanas de incubación, la amonificación es el proceso dominante, lo cual muy probablemente se deba al hecho de que esta serie tiene el más alto porcentaje de materia orgánica que favorece la actividad heterotrófica.

La elevada tasa de nitrificación está indicando que las condiciones predominantes en los suelos superficiales estudiados son aeróbicas.

Es conocido (7, 57, 59, 60) que la buena aireación de los suelos es una característica muy deseable para el desarrollo de los árboles de cacao. Como grandes adiciones de materiales orgánicos crean condiciones anaeróbicas (2), habrá que sugerir que si en los suelos de cacao no

ocurre así, se debe a que los compuestos orgánicos nitrogenados provenientes del cacao y su sombrero son fácilmente mineralizables, coincidiendo con Cunningham (45) y Cunningham y Arnold (46) que también reportan una buena mineralización del N-orgánico en suelos cacaoteros de Ghana. Además la buena nitrificación detectada en los suelos originales (sin incubar) confirma la posición de Cadima y Alvim (35), quienes sostienen que las raíces de Erythrina glauca contribuyen a la aireación del suelo.

A pesar de ser suelos ácidos (pH entre 5,0 y 5,6), la nitrificación fue elevada, superando incluso las concentraciones de N-NO<sub>3</sub> reportadas para suelos neutros tropicales (11, 36, 83). Aunque en general se acepta que la nitrificación es un proceso que funciona mejor en condiciones de neutralidad (13, 37), se ha demostrado que la nitrificación continúa, aun a pH 4,0 (91) y que el aluminio no parece afectar mucho a los microorganismos nitrificantes (16). Una posible explicación a este comportamiento es la dada por Bollen y Wright (17) al señalar que las bacterias quimioautotróficas pueden obtener las bases que necesitan, esencialmente calcio, de la descomposición de los residuos vegetales que llegan al suelo.

La buena transformación de NH<sub>3</sub> a NO<sub>3</sub> implica, como uno de los pasos fundamentales de la reacción, la formación en grandes cantidades de hidroxilamina (NH<sub>2</sub>OH), lo cual está indicando que los residuos de cacao y su sombrero proporcionan al suelo suficiente cobre o que el suelo lo tiene en cantidades suficientes, ya que sin este elemento, tal como encontró Anderson (5), no hay formación de hidroxilamina. Por eso Lees (66) dice que la deficiencia de cobre en los suelos se detecta biológicamente

por el hecho de que la adición de cobre aumenta el poder nitrificante de los suelos.

La influencia de los distintos elementos utilizados en los tratamientos en los procesos de amonificación y nitrificación en los suelos de cacao estudiados, se pueden esquematizar en la Figura 5.

Los distintos elementos aplicados fueron más necesarios para promover la amonificación en los suelos de las series Instituto y La Margot que en la serie Reventazón. Por el contrario, la serie Reventazón necesitó más ayuda de los tratamientos empleados para el proceso de nitrificación que los suelos de las otras dos series.

Como en la reacción amonificación  $\rightarrow$  nitrificación no puede juzgarse por separado a cada uno de sus componentes, el comportamiento general encontrado quiere decir que los suelos de la serie Reventazón tienden a producir, naturalmente, más  $N-NH_3$  y la adición de fertilizantes va a ser aprovechada por los microorganismos como fuente de energía para provocar la oxidación de  $N-NH_3$  a  $N-NO_3$ . Por lo tanto, con el transcurso de la incubación el  $N-NH_3$  disminuye y el  $N-NO_3$  aumenta.

Por otro lado, la nitrificación es más activa en las series Instituto y La Margot. Pero la nitrificación, llegando a un máximo, tiende a disminuir, si no hay más formación de  $N-NH_3$ . De ahí que los elementos adicionados van a ser aprovechados por los microorganismos para transformar más  $N-NH_3$  que a continuación y dentro del ciclo, será oxidado a  $N-NO_3$ . Las distintas dosis estimadas de la superficie de respuesta (Cuadros 3 y 4) se pueden calificar de aceptables para promover la secuencia amonificación-nitrificación. Estas en conjunto son mucho más pequeñas

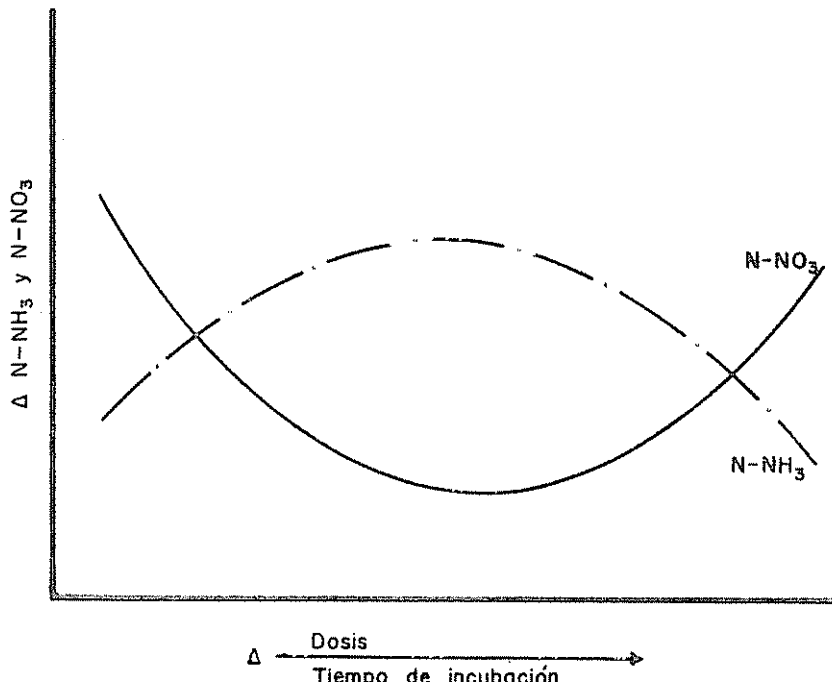


Fig 5- Influencia de los elementos aplicados (N,P,K,Mg y S) en la amonificación y nitrificación de los suelos estudiados.

que las aplicadas en el experimento y conducen en forma favorable. las transformaciones en el proceso amonificación-nitrificación.

El contenido de N en los residuos vegetales de los cacaotales y su sombrío estudiados es más alto que el reportado por Boyer (22) para los cacaotales del Camerún. Muy probablemente esto es una consecuencia de la buena mineralización de los compuestos orgánicos nitrogenados que permiten una mayor asequibilidad del N a disposición de los árboles de cacao. Es lógico pensar que si el metabolismo microbial fuese deficiente, al disminuir la producción de  $N-NH_3$  y  $N-NO_3$ , las posibilidades de nutrición nitrogenada serían menores, lo cual se reflejaría en el porcentaje de N presente en las hojas, que constituyen el mayor porcentaje de los residuos vegetales del cacao y su sombrío. Tal vez esta posición explique las diferencias encontradas en la composición de las hojas del cacao de Turrialba y el Camerún.

## 6. CONCLUSIONES

1. El N-total de los suelos de cacao estudiados es, en su mayor parte (97,3-97,6%), orgánico. Dentro de la fracción orgánica nitrogenada, los aminoácidos representaron el 25-28% del N-total, mientras que los aminoazúcares (44 a 184 ppm) tienen una concentración baja.
2. El N-intercambiable de estos suelos (54,2-75,5% del N-inorgánico total) está constituido en su mayor parte por N-mineral y el resto se atribuye al  $\text{N-NH}_4^+$  derivado de la fracción inorgánica o del N-orgánico hidrolizado en los suelos.
3. La adición de dosis crecientes de materia orgánica tendió a aumentar la actividad microbiana del suelo y disminuyó progresivamente la nitrificación, lo cual constituye una reacción típica de inmovilización.
4. En los suelos ocurre una abundante nitrificación, lo cual es indicativo de una población quimioautotrófica muy activa, capaz de oxidar las formas amoniacales ( $\text{N-NH}_3$ ) a las formas nítricas ( $\text{N-NO}_3$ ).
5. A pesar de la cubierta vegetal, estos suelos de cacao, en las condiciones del experimento, parecen tener una aireación adecuada, indicada por la gran cantidad de  $\text{N-NO}_3$  producido en los suelos sin incubar y en los suelos incubados con los tratamientos.

Esto tiende a confirmar la posición de que los árboles de sombra Erythrina glauca contribuyen a la aireación al facilitar el drenaje del suelo.

6. Existe una amplia formación de hidroxilamina ( $\text{NH}_2\text{OH}$ ), que aumenta con el tiempo de incubación. Este compuesto se forma en el transcurso de la oxidación de  $\text{N-NH}_3$  a  $\text{N-NO}_3$ . De aquí que estos suelos posiblemente tienen un buen nivel de cobre, elemento necesario para la formación de hidroxilamina. El cobre podría proceder del suelo mismo o de los residuos orgánicos que se reciben de los árboles de cacao y su sombrío.
7. La considerable cantidad de N en los residuos (1,5 a 1,8%) justifica la buena mineralización ocurrida en estos suelos. Esto confirma que la mineralización funciona bien cuando los residuos vegetales tienen en su composición 1,5% o más de N.
8. En general el abonamiento de estos suelos tiende a favorecer, más bien, al proceso de amonificación, lo cual parece incidir en una mejor nitrificación. Esto hace pensar que la población microbiana autótrofa es más activa que la heterótrofa.
9. Las distintas dosis estimadas del diseño de superficie de respuesta se pueden calificar de aceptables para promover la secuencia amonificación-nitrificación.



10. A pesar de ser suelos ácidos (pH 5,0-5,6), la nitrificación fue elevada, superando las concentraciones reportadas para suelos neutros del trópico o de zonas templadas.
11. Los fertilizantes utilizados aparecen como convenientes para inducir la mineralización del N en los suelos de cacao. Teniendo en cuenta que cualquiera de los tratamientos tiende a producir concentraciones similares de N-NH<sub>3</sub> y N-NO<sub>3</sub> se podría recomendar la utilización de las dosis mínimas, 50 Kg/ha de N, lo mismo para P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> y 25 Kg/ha para cada uno de los otros, K<sub>2</sub>O, Mg y S.
12. El efecto de los diferentes fertilizantes en la mineralización del N de los suelos estudiados es bastante rápido ya que solamente se requiere un lapso de tiempo comprendido entre 5 y 10 semanas para que la reacción de nitrificación sea completa.

## 7. RESUMEN

Se estudió la mineralización del N en los suelos de cacao de las series La Margot, Instituto y Reventazón, en Turrialba, Costa Rica. Estos suelos son de origen aluvial con alguna influencia volcánica. Corresponden a bosque subtropical húmedo con 2682,5 mm de lluvia al año, altitud entre los 580 y 990 metros sobre el nivel del mar y temperatura de 22,7°C, promedio anual.

Las muestras se incubaron por 5 y 10 semanas a 30°C y humedad ajustada a 0,33 bares, con diferentes niveles de N, P, K, Mg y S, de acuerdo a un diseño de superficie de respuesta. También se incubaron muestras a las que se les adicionaron niveles crecientes de materia orgánica.

Los resultados encontrados muestran que existe una abundante mineralización del N en estos suelos, por lo que la población microbiana es muy activa. La población quimoautotrófica es más activa que la heterotrófica. Esto se deduce porque la nitrificación ocurre en cifras más altas que la amonificación.

Existe un buen estado de aireación, a pesar de la cubierta vegetal. Ocurre una abundante formación de hidroxilamina ( $\text{NH}_2\text{OH}$ ) por lo que el nivel de cobre en estos suelos es adecuado.

Los niveles crecientes de materia orgánica produjeron un efecto detrimental en la mineralización del N, tanto en 5 como en 10 semanas de incubación, dando como consecuencia un aumento de la actividad microbiana. El abonamiento de estos suelos tiene mayor respuesta en el proceso de amonificación que en el de nitrificación.

Los residuos vegetales provenientes del cacao y su sombrío tienen entre 1,5 y 1,8% de N y 37% de carbono orgánico, resultando una relación C/N entre 20,5 y 24,9 , todo lo cual favorece la mineralización del nitrógeno.

## 7a. SUMMARY

The mineralization of nitrogen in cacao soils of the series La Margot, Instituto and Reventazón was studied, in Turrialba, Costa Rica. The soils used are alluvial with some volcanic influence. This area belongs to a humid subtropical forest and lies between 580 a 990 meters above sea level. The mean average temperature and mean average rainfall are 22,7°C and 2682,5 mm per year, respectively. The soil samples, treated with different levels of N, P, K, Mg and S, were incubated during 5 and 10 weeks, with moisture controlled to 0,33 bars and 30°C of temperature. The N-NH<sub>3</sub> and N-NO<sub>3</sub> values obtained were analyzed through the response surface design.

The results have shown that there exists an adequate N-mineralization. This indicates that the microbial population is very active, and since the N-NO<sub>3</sub> formation was higher than was the N-NH<sub>3</sub> production, it can be said that chemoautotrophic metabolism is better than the heterotrophic one. Nitrification appears to happen in spite of soil acidity. The data obtained for nitrification are indicative that cacao soils have aerobic conditions.

Application of increasing amounts of organic matter to the soils stimulated CO<sub>2</sub> release and the N-immobilization is attributable to the N-assimilation by microorganisms. The addition of N, P, K, Mg, and S salts stimulated the amonification more than the nitrification.

The vegetation residues had between 1.5 and 1.8% of N, and 37% of organic C. This means a C/N relation in the cacao residues of 20.5-24.9, which is favorable for the mineralization of nitrogen.

## 8. LITERATURA CITADA

1. AGUIRRE, V. A. Estudio de los suelos del área del Centro Tropical de Enseñanza e Investigación, IICA -CTEI. Turrialba, Costa Rica. Tesis Mg. Sc. Turrialba, Costa Rica, Instituto Interamericano de Ciencias Agrícolas, 1971. 145 p.
2. ALEXANDER, M. Introduction to soil microbiology. New York, Wiley, 1961. 472 p.
3. AMER, F. M. y BARTHOLOMEW, W. V. Influence of oxygen concentration in soil air on nitrification. *Soil Science* 71(3):215-220. 1951.
4. ANDERSON, J. H. Studies on the oxidation of ammonia to hydroxylamine by Nitrosomonas. *Biochemical Journal* 92:1c-3c. 1964.
5. ANDERSON, J. H. Studies on the oxidation of ammonia by Nitrosomonas. *Biochemical Journal* 95:688-698. 1965.
6. BEAR, F. E. Los suelos en relación con el crecimiento de los cultivos. Traducción del Inglés por José Abeijon Veloso. Barcelona, Omega, 1969. 368 p.
7. BELEY, J. y CHEZEAU, R. Caracteristiques physiques et chimiques des sols a cacaoyers de la cote d'Ivoire. *Agronomie Tropicale* 9(4):439-451. 1954.
8. BIRCH, H. P. Nitrification in soils after different periods of droughts. *Plant and Soil* 12:81-92. 1960.
9. \_\_\_\_\_. Mineralization of plant nitrogen following alternate wet and dry conditions. *Plant and Soil* 20:43-49. 1964.
10. BLASCO L., M. Microbiología de suelos, curso. Turrialba, Costa Rica, IICA, CTEI, 1970. 247 p.
11. \_\_\_\_\_. Studies on some aspects of nitrogen in the soil of Colombia. Ph.D. Thesis. University of London, 1966. 311 p.
12. \_\_\_\_\_ y CORNFIELD, A. H. Comparación de diferentes extractantes para determinar el amonio intercambiable en los suelos del Valle del Cauca. *Acta Agronómica (Colombia)* 17:1-12. 1967.

13. BLASCO L., M. y CORNFIELD, A. H. Effects of soil moisture during incubation of the nitrogen mineralizing characteristics of the soils of Colombia. *Geoderma* 1:19-25. 1967.
14. \_\_\_\_\_ y CORNFIELD, A. H.  $\text{NH}_3\text{-N}$ ,  $\text{NO}_3\text{-N}$  y N-mineral en los suelos del Valle del Cauca con y sin adición de  $\text{CO}_3\text{Ca}$  y producción de  $\text{CO}_2$ . *Acta Agronómica (Colombia)* 17:55-61. 1967.
15. \_\_\_\_\_ y CORNFIELD, A. H. Efectos de la adición de celulosa sobre la mineralización y nitrificación del nitrógeno en los suelos del Valle del Cauca. *Agricultural Tropical (Colombia)* 24:113-116. 1968.
16. \_\_\_\_\_ y CORNFIELD, A. H. Nitrification in saline soils acidified with aluminium sulphate. *Geoderma* 5(2):161-164. 1971.
17. BOLLEN, W. B. y WRIGHT, E. Microbes and nitrates in soils from virgin and young growth forest. *Canadian Journal of Microbiology* 7:785-792. 1961.
18. BONNET, J. A. La ciencia del suelo. San Juan, Colegio de Ingenieros Arquitectos y Agrimensores de Puerto Rico, 1968. 249 p.
19. BOON, B. y LAUDELONT, H. Kinetics of nitrate oxidation by Nitrobacter Winogradskyi. *Biochemical Journal* 85:440-447. 1962.
20. BORNEMISZA, E. y PINEDA, E. Minerales amorfos y mineralización del N en suelos derivados de cenizas volcánicas. In Panel sobre suelos derivados de cenizas volcánicas de América Latina. Turrialba, Costa Rica, IICA, 1969. pp. B7. 1-7.
21. BOTTNER, P. La matiere organique des principaux types des sols sous l'etage bioclimatique du chene vert dans le midi de la France. *Science du Sol* no. 1:3-18. 1970.
22. BOYER, J. Evolution saisonniere de la production de la litiere et de la decomposition des feuilles dans une cacaoyere Camerounaise. 4th. International Cocoa Conference Trinidad and Tobago, January, 1972. (No publicado).
23. BREMNER, J. M. The aminoacid in soil. *Nature* 165:367. 1950.
24. \_\_\_\_\_. Determination of fixed ammonium in soil. *Journal of Agricultural Science* 52:147-160. 1959.

25. BREMNER, J. M. Determination of nitrogen in soil by Kjeldahl method. *Journal of Agricultural Science* 55:11-33. 1960.
26. \_\_\_\_\_. Organic forms of nitrogen. *In* Black, C. A., ed. *Methods of soil analysis*. Madison, Wisconsin, American Society of Agronomy, 1965. pp. 1238-1255.
27. \_\_\_\_\_. Nitrogenous compounds. *In* McLaren, A. D. y Peterson, G. H., eds. *Soil Biochemistry*. New York, Dekker, 1967. pp. 19-66.
28. \_\_\_\_\_. y SHAW, K. Studies on the estimation and decomposition of amino-sugars in soil. *Journal of Agricultural Science* 44:152-159. 1954.
29. \_\_\_\_\_. y SHAW, K. Determination of ammonia and nitrate in soil. *Journal of Agricultural Science* 46:320-328. 1955.
30. \_\_\_\_\_. y SHAW, K. Denitrification in soil. II. Factors affecting denitrification. *Journal of Agricultural Science* 51: 40-52. 1958.
31. BROADBENT, F. E., TYLER, K. B. y HILL, G. N. Nitrification of ammoniacal fertilizers in some California soil. *Hilgardia* 27:247-267. 1957.
32. \_\_\_\_\_, JACKMAN, R. H. y McNICOLL, J. Mineralization of carbon and nitrogen in some New Zealand allophanic soils. *Soil Science* 98:118-128. 1964.
33. BROCK, T. D. *Biology of microorganisms*. New York, Prentice-Hall, 1970. 737 p.
34. BUCKMAN, H. y BRADY, N. La economía del nitrógeno de los suelos. *In* \_\_\_\_\_. *Naturaleza y propiedades de los suelos*. Traducción del Inglés por R. Salord Barceló. México, UTEHA, 1966. pp. 426-448.
35. CADIMA, Z. A. y ALVIM, P. de T. Influencia del árbol de sombra *Erythrina glauca* sobre algunos factores edafológicos relacionados con la producción del cacaoero. *Turrialba (Costa Rica)* 17(3):330-336. 1967.
36. CALDER, E. A. Features of nitrate accumulation in Uganda soil. *Journal of Soil Science* 8:60-72. 1957.
37. CAMPBELL, N. E. R. y LEES, H. The nitrogen cycle. *In* McLaren, A. D. y Peterson, G. H., eds. *Soil biochemistry*. New York, Dekker, 1967. pp. 194-215.



38. CHANDRA, P. Note of the effect of shifting temperatures on nitrification in a loam soil. *Canadian Journal of Soil Science* 42:314-315. 1962.
39. CLIFTON, C. E. Introduction to bacterial physiology. London, McGraw, 1957. 414 p.
40. COCHRAN, W. G. y COX, G. M. Diseños experimentales. Trad. de la 2a. edición inglesa. México, Centro Regional de Ayuda Técnica, 1965. 661 p.
41. CORNFIELD, A. H. The mineralization of nitrogen of soil during incubation: Influence of pH, total nitrogen, and organic content. *Journal of the Science of Food and Agriculture* 3:343-349. 1952.
42. \_\_\_\_\_. Mineralization of organic nitrogen compounds in soils as related to soil pH. *Journal of the Science of Food and Agriculture* 10:27-28. 1959.
43. \_\_\_\_\_. A simple technique for determining mineralization of carbon during incubation of soils treated with organics materials. *Plant and Soil* 14:90-93. 1961.
44. \_\_\_\_\_. Carbon dioxide production during incubation of soils treated with cellulose as a possible index of nitrogen status of soils. *Journal of the Science of Food and Agriculture* 12:763-765. 1961.
45. CUNNINGHAM, R. K. Mineral nitrogen in tropical forest soils. *Journal of Agricultural Science* 59:257-262. 1962
46. \_\_\_\_\_. y ARNOLD, P. W. The shade and fertiliser requirements of cacao (*Theobroma cacao*) in Ghana. *Journal of the Science of Food and Agriculture* 13:213-221. 1962.
47. DELWICHE, C. C. Energy relationships in soil biochemistry. In McLaren, A. D. y Peterson, G. H., eds. *Soil biochemistry*. New York, Dekker, 1967. pp.173-193.
48. DIAZ-ROMEU, R., BALERDI, F. y FASSBENDER, H. W. Contenido de materia orgánica y nitrógeno en suelos de América Central. *Turrialba* 20(2):185-192. 1970.
49. DONDOLI, C. y TORRES, J. A. Estudio geagrónómico de la región oriental de la Meseta Central. San José, Costa Rica, Ministerio de Agricultura e Industria, 1954. 180 p.

50. DUCHAUFOR, P. Bioquímie du sol. In \_\_\_\_\_. Précis de pedologie. 2eme ed. Paris, Masson, 1965. pp.109-143.
51. ESCOBAR, H. E. y MARTINEZ, B. N. Efectos de las adiciones de calcio y celulosa en la amonificación y nitrificación de los suelos del Putumayo, Colombia. Tesis Ing. Agr. Pasto, Colombia, Universidad de Nariño, Instituto Tecnológico Agrícola, 1970. 200 p.
52. ESTEVENSON, F. J. Investigations of aminopolysaccharides in soils. II. Distribution of hexosamines in some soils profiles. Soil Science 84:99-106. 1957.
53. FASSBENDER, H. W. Química de suelos. Turrialba, Costa Rica, IICA, 1969. 266 p. (Mimeo).
54. FREDERICK, L. R. The formation of nitrate from ammonia nitrogen in soil. 1. Effect of temperature. Soil Science Society of America Proceedings 20:496-500. 1956.
55. \_\_\_\_\_. Formation of nitrate from ammonia nitrogen in soils. II. Effect of population of nitrifiers. Soil Science 83: 481-485. 1957.
56. GALAKTIONOVA, A. A. Role of individual organic components of peat in the absorption of ammonia. Sovietic Soil Science no. 12:1636-1641. 1968.
57. GAVANDE, S. A. Relaciones de humedad de suelos y de difusión de oxígeno en cacao y café. Fitotecnia Latinoamerica 4(2):99-107. 1967.
58. GOMEZ, J. A., ZORRILLA, D. F. y FLOR, C. A. El nitrógeno total en los suelos cultivados con maíz en el Valle del Cauca. Agricultura Tropical (Colombia) 25(2):101-108. 1969.
59. HARDY, F. Studies on aeration and water supply in some cacao soils of Trinidad. Tropical Agriculture (Trinidad) 20(5): 89-104. 1943.
60. \_\_\_\_\_. Some soil relations of the root system of cacao; further results of investigations in Trinidad. Tropical Agriculture (Trinidad) 21(10):184-195. 1944.
61. \_\_\_\_\_. La relación C/N en los suelos de cacao. Instituto Interamericano de Ciencias Agrícolas. Turrialba (Costa Rica) 9(1):4-11. 1959.

62. HARDY, F. Rasgos principales de los suelos de cacao. In Manual de cacao. Turrialba, Costa Rica. Instituto Interamericano de Ciencias Agrícolas, 1961. pp.73-84.
63. \_\_\_\_\_. The soils of L.A.I.A.S, area. Turrialba, Inter-American Institute of Agricultural Sciences. 1961. 32 p. (Mimeo).
64. HARMSEN, G. W. y VAN SCHREVEN, D. A. Mineralization of organic nitrogen in soil. *Advances in Agronomy* 7:299-398. 1955.
65. INSTITUTO GEOGRAFICO DE COLOMBIA AGUSTIN CODAZZI. Determinación del carbono orgánico. In \_\_\_\_\_. Métodos de análisis de suelos del laboratorio de suelos del departamento agrológico. Publicación no. 1T6. Bogotá, D.E. pp.3-5. 1960.
66. LEES, H. The effect of zinc and copper on soil nitrification. *Biochemical Journal* 42:534-538. 1948.
67. LOSSAINT, P. Etude in vitro de l'influence des litières forestières sur la mineralization de l'azote organique dans un mull acide. *Comptes Rendus de l'Academic de Sciences, Paris*, 253:2245-2247. 1961.
68. LUEKEN, H., HUTCHEON, W. L. y PAUL, E. A. The influence of nitrogen on the decomposition of crop residues in the soil. *Canadian Journal of Soil Science* 42:276-283. 1962.
69. MAHENDRAPPA, M. H., SMITH, R. L. y CHRISTIANSEN, A. T. Nitrifying organisms affected by climatic region in weter United States. *Soil Science of America Proceedings* 30:60-62. 1966.
70. McLEAN, W. The carbon ration of soil organic matter. *Journal of Agricultural Science* 20:348-354. 1930.
71. MEIKLEJOHN, J. Iron and the nitrifying bacteria. *Journal of General Microbiology* 8:58-65. 1953.
72. MILLAR, C. E.; TURK, L. M. y FOTH, H. D. Edafología. Traducción del Inglés por Angel Reynoso Fuller. México, UTEHA, 1962. 612 p.
73. MOLINA, C. E. y BLASCO L., M. El nitrógeno en los suelos derivados de cenizas volcánicas del Altiplano de Pasto, Colombia. *Turrialba (Costa Rica)* 20(3):288-292. 1970.

74. NICHOLAS, D. J. D. The metabolism of inorganic nitrogen and its compounds in microorganisms. *Biological Reviews of the Cambridge Philosophical Society* 38:530-568. 1963.
75. PINEDA, M. J. R. Mineralización del nitrógeno orgánico en algunos suelos de Costa Rica. Tesis Mg. Sc. Turrialba, Costa Rica. Instituto Interamericano de Ciencias Agrícolas. 1969. 79 p.
76. PORTER, L. K. y STEWART, B. A. Organic interferences in the fixation of ammonium by soils and clay minerals. *Soil Science* 109(4):229-233. 1970.
77. PRAAG, H. V. y MANILS, B. Observations sur le fractionnement de l'azote dans quelques sols bruns et acides des forest de l'Ardenne. *Science du Sol* no. 1:65-87. 1966.
78. PUSZTAI, A. Hexosamines in the seeds of higher plants (Spermatophytes). *Nature* 201:1328-1329. 1964.
79. ROBINSON, G. F. Materia orgánica del suelo. In \_\_\_\_\_. Los suelos, su origen, constitución y clasificación. Introducción a la Edafología. Traducción del Inglés por José Luis Amorós. 2a. ed. Barcelona, Omega, 1967. pp.187-216.
80. ROBINSON, J. B. D. Soil Particle - size fraction and nitrogen mineralization. *Journal of Soil Science* 18:109-117. 1967.
81. RUSSELL, E. J. y RUSSELL, E. W. Condiciones del suelo y desarrollo de las plantas. Traducción de la 8a. ed. Inglesa por Gaspar González y González, 3a. ed. Madrid, Aguilar, 1964. 771 p.
82. SHAW, K. Loss of mineral nitrogen from soil. *Journal of Agricultural Science* 58:145-151. 1962.
83. SIMPSON, J. R. The mechanism of surface nitrate accumulation on a bare fallow soil in Uganda. *Journal of Soil Science* 11:45-60. 1960.
84. SOWDEN, F. J. Investigations on the amounts of hexosamines found in various soils and methods for their determination. *Soil Science* 88:138-143. 1959.
85. STEVENSON, J. F. Isolation and identification of some amino-compounds in soils. *Soil Science Society of America Proceedings* 22:308-311. 1958.

86. SUAREZ, J. G. Estudios de las fracciones y volatilización del nitrógeno en dos suelos de Turrialba, Costa Rica. Tesis Mg. Sc. Turrialba, IICA, 1972. 81 p.
87. TISDALE, S. L. y NELSON, W. L. Fertilidad de los suelos y fertilizantes. Traducción del Inglés por Jorge Balasch y Carmen Piña. Barcelona, Montaner y Simón, 1970. 760 p.
88. URBINA, A., SAN MARTIN, E. y SCHAEFER, R. La actividad metabólica de algunos grupos fisiológicos de microbios en suelos Nadis de Chile. I. Mineralización del C y N orgánicos en condiciones de laboratorio. Agricultura Técnica (Chile) 29:145-160. 1969.
89. VAN SCHREVEN, D. A. A comparison between the effect of fresh and dried organic materials added to soil on carbon and nitrogen mineralization. Plant and Soil 20:149-165. 1964.
90. \_\_\_\_\_. Mineralization of carbon and nitrogen of plant material added to soil and of the soil humus during incubation following periodic drying and wetting of the soil. Plant and Soil 28:226-245. 1968.
91. WEBER, D. F. y GAINNEY, P. L. Relative sensitivity of nitrifying organisms to hydrogen ions in soils and in solution. Soil Science 94:138-145. 1962.
92. WINOGRADSKY, S. N. Microbiologie du sol. Paris, Masson, 1949. 861 p.
93. WINSOR, G. W. y POLLARD, A. G. Carbon-nitrogen relationships in soil. I. The immobilization of nitrogen in the presence of carbon compound. Journal of the Science of Food and Agriculture 7:134-141. 1956.
94. \_\_\_\_\_. Carbon-nitrogen relationships in soil. II. Quantitative relationships between nitrogen immobilized and carbon added to the soil. Journal of the Science of Food and Agriculture 7:142-149. 1956.
95. \_\_\_\_\_. Carbon-nitrogen relationships in soil. III. Comparison of immobilization of nitrogen in a range of soil. Journal of the Science of Food and Agriculture 6:613-617. 1956.
96. \_\_\_\_\_. Carbon-nitrogen relationships in soil. IV. Mineralization of carbon and nitrogen. Journal of the Science of Food and Agriculture 7:618-624. 1956.

A P E N D I C E

Cuadro 5. Tratamientos utilizados, de acuerdo al diseño de superficie de respuesta con composición central, en los estudios de mineralización del N en las series La Margot, Instituto y Reventazón

N° del trata- miento	N	P	K	Mg	S
0	0	0	0	0	0
1	50	50	25	25	75
2	150	50	25	25	25
3	50	150	25	25	25
4	150	150	25	25	75
5	50	50	75	25	25
6	150	50	75	25	75
7	50	150	75	25	75
8	150	150	75	25	25
9	50	50	25	75	25
10	150	50	25	75	75
11	50	150	25	75	75
12	150	150	25	75	25
13	50	50	75	75	75
14	150	50	75	75	25
15	50	150	75	75	25
16	150	150	75	75	75
17	150	150	75	75	25
18	50	150	75	75	75

...

Cuadro 5 (cont.)

N° del trata- miento	Tratamientos en Kg/ha				
	N	P	K	Mg	S
19	150	50	75	75	75
20	50	50	75	75	25
21	150	150	25	75	75
22	50	150	25	75	25
23	150	50	25	75	25
24	50	50	25	75	75
25	150	150	75	25	75
26	50	150	75	25	25
27	150	50	75	25	25
28	50	50	75	25	75
29	150	150	25	25	25
30	50	150	25	25	75
31	150	50	25	25	75
32	50	50	25	25	25
33	0	100	50	50	50
34	200	100	50	50	50
35	100	0	50	50	50
36	100	200	50	50	50
37	100	100	0	50	50
38	100	100	100	50	50

...



Cuadro 5 (cont.)

N° del trata- miento	Tratamientos en Kg/ha				
	N	P	K	Mg	S
39	100	100	50	0	50
40	100	100	50	100	50
41	100	100	50	50	0
42	100	100	50	50	100
43	100	100	50	50	50
44	100	100	50	50	50
45	100	100	50	50	50
46	100	100	50	50	50
47	100	100	50	50	50
48	100	100	50	50	50
49	100	100	50	50	50
50	100	100	50	50	50
51	100	100	50	50	50
52	100	100	50	50	50

Cuadro 6. Mineralización del nitrógeno (N-NH<sub>3</sub> y N-NO<sub>3</sub>) en los suelos estudiados incubados con adición de materia orgánica

Serie de suelo	Nivel M.O. %	5 semanas		10 semanas	
		N-NH <sub>3</sub>	N-NO <sub>3</sub>	N-NH <sub>3</sub>	N-NO <sub>3</sub>
		ppm		ppm	
La Margot	0	10,8	79,8	9,2	82,9
	0,1	9,9	88,7	6,4	59,8
	0,3	12,6	35,9	13,8	39,6
	0,7	34,1	14,3	6,4	19,0
	1	52,9	9,9	11,0	8,3
Instituto	0	11,7	69,0	9,2	82,9
	0,1	15,2	66,3	4,6	86,5
	0,3	10,8	64,5	3,7	51,6
	0,7	10,8	17,9	9,2	26,7
	1	10,8	11,6	5,5	10,1
Reventazón	0	10,8	56,4	9,2	83,8
	0,1	10,8	59,2	9,2	104,9
	0,3	11,7	41,0	4,6	101,3
	0,7	64,5	17,9	12,0	58,0
	1	3,6	10,8	9,2	45,1

Cuadro 7. Producción de CO<sub>2</sub> en los suelos incubados con distintos niveles de materia orgánica

% de M.O. adicionada	CO <sub>2</sub> mg/ 10 g de suelo	
	5 semanas	10 semanas
Serie La Margot		
0	24,86	56,98
0,1	32,34	55,88
0,3	29,70	57,64
0,7	29,48	64,02
1	24,86	76,56
Serie Instituto		
0	23,98	44,66
0,1	24,42	49,88
0,3	30,80	63,36
0,7	36,30	65,77
1	34,32	70,84
Serie Reventazón		
0,	26,84	51,92
0,1	34,98	57,42
0,3	27,72	54,78
0,7	40,92	75,46
1	41,14	77,88

Cuadro 8. N-total y peso de las hojas adicionadas por el cacao y su sombrío, a los suelos estudiados

Fecha de recogida de los residuos	N-total (ppm)			Peso seco/9,00 m <sup>2</sup> (gramos)		
	La Margot	Instituto	Reventazón	La Margot	Instituto	Reventazón
Abr.20-Mayo 20	17770	15280	14750	200,9	212,8	259,3
Mayo 20-Jun.18	20610	18830	14390	267,6	256,8	216,7
Jun.18-Julio 30	22030	16700	17590	302,5	288,3	670,4
Jul.30-Agto. 18	22390	20960	15630	143,9	266,9	134,2
Agto.18-Set. 24	14210	14030	14920	174,0	600,0	569,4
Set. 24-Oct. 8	11730	13150	13520	87,3	332,7	141,7
Totales				1176,2	1947,5	1491,7

Cuadro 9. Carbono, nitrógeno y relación C/N promediados de los residuos vegetales de cacao y su sombrío, recibidos por los suelos estudiados

Serie de suelo	C %	N ppm	C/N
La Margot	37,1	18120	20,5
Instituto	37,5	16491	22,7
Reventazón	37,7	15133	24,9

Cuadro 10. N-NH<sub>3</sub>, N-NO<sub>3</sub> y N-mineral en el suelo de la serie La Margot, incubado (28-30°C y 0,33 bares) con distintos tratamientos. Resultados en ppm

Trata - miento	5 semanas de incubación			10 semanas de incubación		
	N-NH <sub>3</sub>	N-NO <sub>3</sub>	N-mineral	N-NH <sub>3</sub>	N-NO <sub>3</sub>	N-mineral
0	10,8	79,8	90,6	9,2	82,9	92,1
1	7,4	58,0	65,4	10,8	111,2	122,0
2	36,8	45,0	81,8	26,9	40,3	67,2
3	2,8	96,7	99,5	10,8	102,1	112,9
4	25,8	33,1	58,9	14,3	113,8	128,1
5	30,4	48,8	79,2	6,3	81,6	87,9
6	0	15,7	15,7	106,7	21,5	128,2
7	0	53,4	53,4	10,8	92,3	103,1
8	23,0	45,1	68,1	7,2	117,4	124,6
9	0	40,5	40,5	5,4	104,9	109,9
10	23,9	31,3	55,2	0	120,1	120,1
11	0	64,4	64,4	1,8	102,2	104,0
12	27,6	41,4	69,0	0	117,4	117,4
13	7,4	52,5	59,9	8,1	98,6	106,7
14	28,5	78,3	106,8	9,9	144,3	154,2
15	6,4	61,7	68,1	6,3	112,1	118,4
16	22,1	111,4	133,5	14,4	136,3	150,7
17	12,9	129,8	142,7	11,7	139,8	151,5
18	6,4	77,3	83,7	13,4	97,7	111,1

...

Cuadro 10 (cont.)

Trata- miento	5 semanas de incubación			10 semanas de incubación		
	N-NH <sub>3</sub>	N-NO <sub>3</sub>	N-mineral	N-NH <sub>3</sub>	N-NO <sub>3</sub>	N-mineral
19	30,4	78,3	108,7	16,1	130,0	146,1
20	8,3	61,7	70,0	9,9	132,7	142,6
21	23,0	78,3	101,3	9,9	137,2	147,1
22	5,5	70,9	76,4	9,9	130,0	139,9
23	24,9	73,7	98,6	6,3	146,1	152,4
24	4,6	41,4	46,0	10,8	122,8	133,6
25	32,2	61,7	93,9	17,9	130,0	147,9
26	4,6	95,7	100,3	10,3	136,2	146,5
27	28,5	63,5	92,0	17,0	140,7	157,7
28	8,3	53,4	61,7	15,2	118,3	133,5
29	28,5	23,0	51,5	13,4	139,8	153,2
30	3,7	116,9	120,6	9,9	124,6	134,5
31	18,4	115,1	133,5	14,3	124,6	138,9
32	3,9	70,9	74,8	14,3	111,2	125,5
33	4,6	49,7	54,3	15,2	118,3	133,5
34	35,9	80,1	116,0	13,4	130,0	143,4
35	16,6	42,3	58,9	26,9	117,4	144,3
36	23,9	51,6	75,5	16,1	118,3	134,4
37	21,2	38,7	59,9	14,3	117,3	131,6

...

Cuadro 10 (cont.)

Trata- miento	5 semanas de incubación			10 semanas de incubación		
	N-NH <sub>3</sub>	N-NO <sub>3</sub>	N-mineral	N-NH <sub>3</sub>	N-NO <sub>3</sub>	N-mineral
38	11,0	75,5	86,5	15,2	143,4	158,6
39	16,6	45,1	61,7	14,3	113,8	128,1
40	18,4	33,1	51,5	14,3	96,8	111,1
41	16,6	45,1	61,7	15,6	121,0	136,6
42	11,0	119,7	130,7	14,3	105,8	120,1
Media 43 a 52	16,7	51,9	68,6	16,7	112,6	129,3

Cuadro 11. N-NH<sub>3</sub>, N-NO<sub>3</sub> y N-mineral en el suelo de la serie Instituto, incubado (28-30°C y 0,33 bares) con distintos tratamientos. Resultados en ppm

Trata- miento	5 semanas de incubación			10 semanas de incubación		
	N-NH <sub>3</sub>	N-NO <sub>3</sub>	N-mineral	N-NH <sub>3</sub>	N-NO <sub>3</sub>	N-mineral
0	11,7	69,0	80,7	9,2	82,9	92,1
1	12,9	75,5	84,4	11,7	120,1	131,8
2	54,3	11,0	65,3	16,1	161,4	177,5
3	18,4	48,8	67,2	19,7	123,7	143,4
4	33,1	91,1	124,2	15,2	157,7	172,9
5	11,0	93,0	104,0	16,1	113,8	129,9
6	35,9	99,4	135,3	17,0	143,4	160,4
7	17,4	47,9	65,3	10,8	118,3	129,1
8	46,0	72,7	118,7	20,6	146,1	166,7
9	14,7	93,9	108,6	11,7	105,8	117,5
10	47,9	82,9	130,8	28,7	144,3	173,0
11	24,9	31,3	56,2	26,0	112,9	138,9
12	31,3	87,5	118,8	14,3	156,0	170,3
13	7,4	83,8	91,2	23,3	106,7	130,0
14	24,9	103,1	128,0	18,8	134,5	153,3
15	9,2	87,5	96,7	17,0	104,9	121,9
16	21,2	119,7	140,9	15,2	152,4	167,6
17	47,0	54,3	101,3	18,0	120,1	138,1
18	12,0	99,4	111,4	16,1	120,1	136,2

...



Cuadro 11. (cont.)

Trata- miento	5 semanas de incubación			10 semanas de incubación		
	N-NH <sub>3</sub>	N-NO <sub>3</sub>	N-mineral	N-NH <sub>3</sub>	N-NO <sub>3</sub>	N-mineral
19	50,6	40,5	91,1	22,4	148,8	171,2
20	19,3	35,0	54,3	17,9	104,0	121,9
21	45,1	58,9	104,0	18,8	147,9	166,7
22	17,5	33,1	50,6	17,9	92,7	110,6
23	28,5	111,4	139,9	13,4	143,4	156,8
24	18,4	47,0	65,4	13,4	101,3	114,7
25	41,4	63,5	104,9	13,4	134,5	147,9
26	19,3	42,3	61,6	10,8	97,7	108,5
27	54,3	55,2	109,5	15,2	152,4	167,6
28	27,6	34,1	61,7	10,0	107,6	117,6
29	45,1	58,9	104,0	10,0	148,8	158,8
30	12,9	47,0	59,9	14,3	101,3	115,6
31	45,1	64,4	109,5	14,3	143,4	157,7
32	14,7	65,4	80,1	15,2	103,1	118,3
33	8,3	32,9	41,2	11,7	90,5	102,2
34	55,2	69,0	124,2	17,9	140,7	158,6
35	26,7	70,9	97,6	17,9	127,3	145,2
36	22,1	82,9	105,0	18,8	129,1	147,9
37	29,5	45,1	74,6	15,2	130,9	146,1
38	26,7	55,2	81,9	13,4	112,1	125,5

...

Cuadro 11 (cont.)

---

Trata- miento	N-NH <sub>3</sub>	N-NO <sub>3</sub>	N-mineral	N-NH <sub>3</sub>	N-NO <sub>3</sub>	N-mineral
39	24,9	52,5	77,4	14,3	105,8	120,1
40	15,7	94,8	110,5	14,3	104,9	119,2
41	34,1	46,0	80,1	17,9	121,9	139,8
42	36,8	29,5	66,3	14,3	104,9	119,2
Media 43 a 52	36,5	60,6	97,1	15,5	123,8	139,3

---

Cuadro 12. N-NH<sub>3</sub>, N-NO<sub>3</sub> y N-mineral en el suelo de la serie Reventazón, incubado (28-30°C y 0,33 bares) con distintos tratamientos. Resultados en ppm

Trata- miento	5 semanas de incubación			10 semanas de incubación		
	N-NH <sub>3</sub>	N-NO <sub>3</sub>	N-mineral	N-NH <sub>3</sub>	N-NO <sub>3</sub>	N-mineral
0	10,8	56,5	67,3	9,2	83,8	92,0
1	30,4	11,0	41,4	14,3	105,8	120,1
2	42,3	45,1	87,4	21,5	155,1	176,6
3	23,9	40,5	64,4	14,3	112,1	126,4
4	45,1	18,4	63,5	12,6	143,4	156,0
5	46,0	10,1	56,1	17,9	82,5	100,4
6	46,0	23,9	69,9	17,9	40,7	58,6
7	20,3	34,9	55,2	16,1	130,9	147,0
8	27,6	104,0	131,6	17,9	118,3	136,2
9	19,3	24,9	44,2	17,9	95,0	112,9
10	40,5	10,1	50,6	15,2	121,0	136,2
11	28,5	9,2	37,7	12,6	89,6	102,2
12	46,0	52,4	98,4	17,9	135,4	153,3
13	53,4	5,5	58,9	19,7	105,8	125,5
14	55,2	4,6	59,8	22,4	147,9	170,3
15	28,5	38,7	67,2	22,4	108,5	130,9
16	41,4	18,4	59,8	17,9	103,1	121,0
17	46,0	13,8	59,8	15,2	145,2	160,4
18	33,1	12,0	45,8	26,0	109,4	135,4

...

Cuadro 12 (cont.)

Trata- miento	5 semanas de incubación			10 semanas de incubación		
	N-NH <sub>3</sub>	N-NO <sub>3</sub>	N-mineral	N-NH <sub>3</sub>	N-NO <sub>3</sub>	N-mineral
19	60,8	4,6	65,4	18,8	160,5	179,3
20	28,5	18,4	46,9	18,8	105,8	124,6
21	32,2	81,0	113,2	18,8	122,8	141,6
22	36,2	5,5	41,7	18,8	94,1	112,9
23	41,4	49,7	91,1	17,9	130,9	148,8
24	47,9	4,6	52,5	14,3	119,2	133,5
25	23,9	92,1	116,0	19,7	137,2	156,9
26	44,2	4,6	48,8	14,3	102,2	116,5
27	29,5	92,1	121,6	17,9	137,1	155,0
28	44,2	6,4	50,6	14,3	125,5	139,8
29	42,3	47,0	89,3	17,9	144,3	162,2
30	41,4	4,6	46,0	17,9	112,1	130,0
31	41,4	30,4	71,8	14,3	139,8	154,1
32	46,0	13,8	59,8	17,9	96,6	114,5
33	12,0	40,5	52,5	14,3	89,6	103,9
34	52,5	43,3	95,5	17,9	140,7	158,6
35	53,4	8,3	61,7	17,0	143,4	160,4
36	25,8	42,3	68,1	17,9	126,4	144,3
37	34,1	25,8	59,9	16,1	150,6	166,7
38	31,3	23,9	55,2	20,6	122,8	143,4
						...

Cuadro 12 (cont.)

Trata- miento	5 semanas de incubación			10 semanas de incubación		
	N-NH <sub>3</sub>	N-NO <sub>3</sub>	N-mineral	N-NH <sub>3</sub>	N-NO <sub>3</sub>	N-mineral
39	60,8	8,3	69,1	17,9	91,4	109,3
40	17,5	110,5	128,0	17,9	122,8	140,7
41	30,4	48,8	79,2	14,3	130,4	145,2
42	38,7	21,2	59,9	17,9	126,4	144,3
Media 43 a 52	44,3	24,6	68,9	15,9	127,1	143,0