

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA

FACULTAD DE AGRONOMÍA

DEPARTAMENTO DE PRODUCCIÓN VEGETAL



“Por un desarrollo agrario integral y sostenible”

TRABAJO DE DIPLOMA

**ESTIMACIÓN DE LA MINERALIZACIÓN NETA DE NITRÓGENO DEL SUELO
EN SISTEMAS AGROFORESTALES Y A PLENO SOL EN EL CULTIVO DEL
CAFÉ (*Coffea arabica* L.), EN EL PACÍFICO DE NICARAGUA, DEPARTAMENTO
DE CARAZO**

AUTORES:

**WILFREDO FUENTES MAS ÍS
OSWALDO JOSÉ GONZÁLEZ RODRÍGUEZ**

ASESORES:

**Ing. MSc. LEONARDO GARCÍA CENTENO
Ing. MSc. MARTHA GUTIÉRREZ CASTILLO**

MANAGUA, NICARAGUA

JUNIO, 2007

DEDICATORIA

A mi querida madre, Lic. Ada Masís Obregón.

A la memoria de Ervin Masís Obregón (*q.e.p.d.*).

Wilfredo Fuentes Masís

A la memoria de mi madre Raquel Rodríguez A. (*q.e.p.d.*).

A mis abuelos José Rodríguez y Juana Aguirre.

Oswaldo González Rodríguez

AGRADECIMIENTO

Reiteramos nuestro franco agradecimiento a las personas que con el aporte ofrecido intervinieron en el fortalecimiento y consolidación de la presente investigación, permitiendo culminar con éxito nuestra formación profesional.

Wilfredo Fuentes Masís
Oswaldo González Rodríguez

ÍNDICE GENERAL

SECCIÓN	PÁGINA
DEDICATORIA.....	i
AGRADECIMIENTO.....	ii
ÍNDICE GENERAL.....	iii
LISTA DE TABLAS.....	vi
LISTA DE FIGURAS.....	vii
LISTA DE ANEXOS.....	viii
RESUMEN.....	ix
ABSTRACT.....	xi
I. INTRODUCCIÓN.....	1
II. OBJETIVOS.....	5
2.1 General.....	5
2.2 Específicos.....	5
III. HIPÓTESIS.....	6
IV. REVISIÓN DE LITERATURA.....	7
4.1 Componentes del nitrógeno del suelo.....	7
4.1.1 Nitrógeno orgánico.....	7
4.1.2 Nitrógeno inorgánico.....	7
4.2 Contenido de nitrógeno en el suelo.....	8
4.3 Importancia del nitrógeno para las plantas.....	8
4.4 Ciclo del nitrógeno.....	10
4.4.1 El ciclo del nitrógeno en suelos agrícolas.....	12
4.4.1.1 Mineralización del nitrógeno.....	15
4.4.1.1.1 Aminación.....	16
4.4.1.1.2 Amonificación.....	18
4.4.1.1.3 Nitrificación.....	19
4.4.1.1.3.1 Condiciones de suelo que afectan la nitrificación.....	20
4.4.1.2 Nitrógeno potencialmente mineralizable.....	25

4.4.1.2.1 Transformaciones del N-NO ₃ ⁻	27
4.4.2 Pérdidas de N del suelo.....	29
4.4.2.1 Desnitrificación.....	29
4.4.2.2 Inmovilización.....	29
4.4.2.3 Lixiviación.....	30
4.4.2.4 Saturación.....	30
4.4.2.5 Significación ambiental de las pérdidas del nitrógeno.....	31
4.5 Disponibilidad del nitrógeno con relación al pH.....	32
4.6 Influencia de la materia orgánica en la fertilidad del suelo.....	35
4.7 Aspectos generales ligados al cultivo del café.....	35
4.7.1 El café y el nitrógeno: manejo eficiente de la fertilización nitrogenada.....	36
4.7.1.1 Épocas de fertilización, fraccionamiento y cantidad del fertilizante.....	37
4.7.2 Aspectos generales ligados al uso de árboles de sombra en el café.....	37
V. MATERIALES Y MÉTODOS	43
5.1 Ubicación del sitio de estudio.....	43
5.2 Caracterización del suelo.....	44
5.3 Características de los sistemas de manejo bajo estudio.....	45
5.4 Muestreo del suelo.....	48
5.5 Montaje del experimento y preparación de las muestras.....	48
5.5.1 Estimación de la mineralización neta del nitrógeno del suelo.....	48
5.5.1.1 Procedimiento en laboratorio para la extracción del nitrógeno mineral.....	49
5.5.2 Procedimiento para determinación colorimétrica del N mineral.....	50
5.5.2.1 Determinación colorimétrica del nitrato.....	50
5.5.2.2 Determinación colorimétrica del amonio	52

5.6 Variables observadas.....	53
5.7 Análisis de los datos.....	54
VI. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	55
6.1 Biomasa incorporada al sistema producto de la poda.....	55
6.2 Mineralización neta del nitrógeno orgánico.....	56
6.2.1 Comportamiento del N mineral de los sistemas evaluados en los sitios de muestreo.....	60
6.2.2 Comportamiento de las fracciones del N mineral del suelo.....	64
VII. CONCLUSIONES.....	67
VIII. RECOMENDACIONES.....	68
IX. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	69
ANEXOS.....	79

LISTA DE TABLAS

TABLA N°		PÁGINA
Tabla 1.	Características físicas del suelo en la finca San Francisco, Carazo.	44
Tabla 2.	Características químicas del suelo en la finca San Francisco, Carazo.	44
Tabla 3.	Momento de aplicación, productos químicos y dosis de herbicidas utilizados en el experimento.	46
Tabla 4.	Momento, productos y dosis de agroquímicos aplicados a los sistemas de manejo.	47
Tabla 5.	Momento, fórmulas y dosis de fertilizantes aplicados a las dos parcelas sometidas a fertilizaciones.	47
Tabla 6.	Muestreo para determinación de disponibilidad de nitrógeno.	48
Tabla 7.	Valores acumulados de nitrógeno mineralizado al término del período de incubación en los diferentes sistemas de cultivos de café. Finca San Francisco, Carazo.	58
Tabla 8.	Mineralización neta de ambas fracciones del N mineral de los sistemas en estudio al término del período de incubación.	64

LISTA DE FIGURAS

FIGURA N°		PÁGINA
Figura 1.	Ciclo del Nitrógeno.	12
Figura 2.	Mineralización del nitrógeno orgánico.	15
Figura 3.	Eutrofización de las aguas.	32
Figura 4.	El pH del suelo, la disponibilidad relativa de nutrientes vegetales y la actividad de la microflora edáfica (mientras más ancha la banda, mayores son la disponibilidad y la actividad).	34
Figura 5.	Los tres grupos de factores principales que determinan la decisión de si se cultiva café con o sin sombra. La combinación de factores determina la densidad y diversidad de los árboles asociados.	38
Figura 6.	Ubicación geográfica de la finca San Francisco, Departamento de Carazo, Nicaragua.	43
Figura 7.	Descripción de los tratamientos.	45
Figura 8.	Evolución de la mineralización neta en los diferentes sistemas de cultivo de café, a una profundidad de 0-20 cm. Finca San Francisco, Carazo.	61

LISTA DE ANEXOS

ANEXO N°		PÁGINA
Anexo 1.	Descripción de la variedad de café Costa Rica 95.	80
Anexo 2.	Características agroproductivas de la variedad Costa Rica 95	81
Anexo 3.	Comportamiento de las fracciones del nitrógeno mineral en cada tratamiento .	83

Fuentes M., W.; González R., O. 2007. Estimación de la Mineralización Neta del Nitrógeno del Suelo en Sistemas Agroforestales y a Pleno Sol en el Cultivo del Café (*Coffea arabica* L.), en el Pacífico de Nicaragua, Departamento de Carazo. Tesis Ing. Agrónomo. UNA. Managua, Nicaragua. 85 p.

Palabras clave: nitrógeno, mineralización, inmovilización, biomasa, amonio, nitrato, café, Madero Negro.

RESUMEN

Se estimó la producción neta de nitrógeno mineral a partir de la mineralización de la materia orgánica en sistemas agroforestales con café (*Coffea arabica* L.), así como en el sistema a pleno sol, en los sitios tanto calle como en hilera. La evaluación se llevó a cabo al final de la estación seca en marzo del 2004, en la zona sudoeste de Nicaragua, en el Departamento de Carazo. La variedad de cafeto establecida en la finca seleccionada fue Costa Rica 95. La especie de sombra incorporada fue Madero Negro [*Gliricidia sepium* (Jacquin) Kunth ex Walpers].

Se realizó la caracterización de las propiedades físicas y químicas del suelo Andisol de los sistemas evaluados. Las muestras del suelo de los sistemas examinados en el experimento se incubaron bajo condiciones de laboratorio a una temperatura constante de 30 °C, se mantuvo la humedad de las mismas a capacidad de campo y se determinó la cantidad neta de nitrógeno mineral producida durante los 30 días del estudio.

Al finalizar el experimento, los resultados obtenidos mostraron que el sistema Sombra con Fertilizante (SF) incorporó mayor cantidad de biomasa y de nitrógeno que los otros sistemas inspeccionados. Los sistemas Sombra con Fertilizante y Pleno Sol con Fertilizante (PSF) presentaron los mayores contenidos de nitrógeno mineral en ambos sitios de muestreo; sin embargo, en el sistema Sombra sin Fertilizante (SSF) se mineralizó la mayor cantidad de nitrógeno orgánico en los sitios muestreados. A los 0-20 cm de profundidad del muestreo, en el sitio Hilera, el amonio mostró mayor contenido en los todos los sistemas,

no así el nitrato, que mostró mayor contenido en el sitio Calle, que, además, fue la forma dominante del contenido total de nitrógeno mineral.

Fuentes M., W.; González R., O. 2007. Estimating Net Mineralization of Soil Nitrogen in Agroforestry and Full Sun Systems in Coffee (*Coffea arabica* L.), in the Pacific of Nicaragua, District of Carazo. Thesis Agriculture Engineer. UNA. Managua, Nicaragua. 85 p.

Key words: nitrogen, mineralization, immobilization, biomass, ammonium, nitrate, coffee, Madero Negro.

ABSTRACT

The study was undertaken to estimate net mineralization of soil nitrogen in shaded coffee (*Coffea arabica* L.) as in full sun system, and the selected soil samples places were coffee row and inter-row. The evaluation was carried out at the end of the dry season in March 2004 in the southwestern zone of Nicaragua, District of Carazo. The variety of coffee established in the farm was Costa Rica 95 and the shade specie associated with coffee crop was Madero Negro [*Gliricidia sepium* (Jacquin) Kunth ex Walpers].

Physical and chemical properties of the Andisol soil from the evaluated systems were determined. Soil samples were incubated under laboratory conditions with a constant temperature of 30 °C; water content was maintained at field capacity and laboratory incubations were conducted for 30 days.

At the end of the experiment, the results showed that Shaded Fertilized (SF) system incorporated into the soil the largest amount of biomass and nitrogen than the others. Shaded Fertilized and Full Sun Fertilized (PSF) systems showed the largest amounts of mineral nitrogen in both sample places; however, in the Shaded Unfertilized (SSF) system the results showed it was mineralized the largest amount of organic nitrogen. In the 0-20 cm soil sample depth in the coffee row ammonium had the greater contents in all evaluated systems; unlike nitrate that showed greater contents in the inter-row sample place, and besides nitrate was overwhelmingly the dominant form of total mineral nitrogen.

I. INTRODUCCIÓN

América Central es la tercera región cafetalera del mundo y el cultivo de café (*Coffea arabica* L.) es uno de sus principales productos de exportación, por lo tanto, está estrechamente ligado al desarrollo socioeconómico del Istmo. Es, sin duda, el cultivo que más ha contribuido a formar el paisaje de las cordilleras volcánicas (Bertrand *et al.*, 1999).

La producción cafetalera en Nicaragua descansa en manos de pequeños, medianos y grandes productores, que en su número oscilan entre los 30 ó 40 mil. En el país se siembra unas 91,338 ha de café (130 mil manzanas) de distintas variedades y a distintas alturas, y se produce anualmente alrededor de 900,000 sacos de 60 kg. El rendimiento promedio es de 711 kg ha⁻¹, lo que nos ubica en el país del Istmo con más baja productividad (Rodríguez, 2000).

La nutrición del cafeto es uno de los principales factores que influyen en la productividad, siendo las variedades de café con alta capacidad de producción y sembradas con alta densidad de siembra los que requieren una gran cantidad de nutrientes para obtener abundantes cosechas; por esta razón, salvo pocas excepciones, se requiere de programas intensivos de fertilización para restituir la fertilidad de los suelos.

Es ampliamente conocido el efecto que ejercen los fertilizantes tanto químicos como orgánicos en el desarrollo y rendimientos de los cafetos. Particular importancia se le atribuye al nitrógeno, considerado el elemento más decisivo en la producción de los cultivos; su naturaleza gaseosa, que lo vuelve muy inestable para su aprovechamiento por las plantas, repercute en que las cantidades a usar sean altas; sin embargo, las demandas varían según las condiciones propias de cada zona y aún de la edad y manejo de la plantación de café.

Cáceres (1997), señala que en Nicaragua las zonas cafetaleras están claramente definidas, pero el uso del nitrógeno, al menos en la región del Pacífico del país, está regido más por la capacidad económica para este nutriente esencial, que por razones de orden tecnológico.

La fertilización nitrogenada no sólo persigue obtener un elevado retorno económico de la inversión a través de la calidad y producción optimizada del cultivo, sino también minimizar sus

efectos sobre el medioambiente (lixiviación del nitrógeno residual del suelo hacia las aguas subterráneas, pérdidas de nitrógeno por desnitrificación o volatilización). Existen estudios que cuantifican los posibles efectos negativos sobre el medio ambiente de distintas prácticas agrícolas en diferentes sistemas. Dado que el nitrógeno mineral en los suelos incrementa la emisión de óxido nitroso (N_2O) y reduce las posibilidades de que el metano (CH_4) sea oxidado. Hay investigaciones que cuantifican las emisiones de N_2O y CH_4 producidas en sistemas agrícolas con distinto tipo de manejo y cultivo, así como aquellos estudios, el de Reynolds-Vargas *et al.* (1994), por ejemplo, que examinan el impacto que causan las pérdidas de nitratos a través del perfil del suelo hacia las aguas subterráneas.

Las constantes caídas de precios en el mercado del café provocan la exploración de alternativas de producción y de nichos de demanda no saturados. Una opción es el cultivo de café bajo árboles de sombra; considerando que el café tiene características de una planta de sombra, es calificado como un tipo de agroforestería, la que ha crecido en superficie e importancia económica.

Entre algunas ventajas que dicho sistema ofrece se acierta la disminución de los costos de producción, ingresos económicos adicionales, modera los factores microclimáticos reduciendo el estrés de la planta, disponibilidad de humedad, mantenimiento de la fertilidad del suelo por medio del reciclaje de nutrientes, fijación de nitrógeno al suelo por especies leguminosas, entre otros. Todo esto para mitigar algunos de los impactos negativos del uso de agroquímicos en la agricultura convencional (Barradas y Fanjul, 1986; Reganold *et al.*, 1993; Lyngbaeck *et al.*, 2001; Vaast y Snoeck, 1999).

En las plantaciones de café del Pacífico de Nicaragua, particularmente en el departamento de Carazo, una de las especies de leguminosas utilizada como árbol de sombra es el Madero Negro [*Gliricidia sepium* (Jacquin) Kunth ex Walpers], que es nativa de las regiones tropicales de México; siendo ampliamente utilizada para cercas vivas, leña, sombra para cafetales; esta especie representa una opción válida para la sostenibilidad del sistema agrícola, aportando parte del nitrógeno requerido por los cultivos agrícolas mediante el aumento de materia orgánica del suelo y la posterior mineralización de la misma; además se le atribuye ser una especie con alta capacidad fijadora de nitrógeno.

Mediante el proceso de mineralización que sufre la materia orgánica, considerada como una fuente importante de nitrógeno, se transforman las formas orgánicas de este elemento a formas minerales asimilables por las plantas, amonio (NH_4^+) y nitrato (NO_3^-), contribuyendo así al uso correcto del nutriente en las variables de manejo del cultivo de café y a la recuperación de la fertilidad natural de los suelos.

Los factores con mayor incidencia en la mineralización son la temperatura, siendo óptima para la mayoría de los microorganismos entre 25 y 35 °C con una temperatura base de 5 °C, y aquéllos que condicionan el grado de aireación del suelo (textura, estructura, contenido de humedad (Stanford *et al.*, 1973), donde el estrés hídrico limita la actividad biológica mientras el exceso de humedad crea un ambiente pobre en oxígeno. Otros factores a considerar son el pH del suelo, ya que la descomposición es inhibida en medios fuertemente ácidos (Henry y Boyd, 1988) y la presencia de metales pesados como Pb, Cd y Hg, también reduce la mineralización (Chang y Broadbent, 1982).

Al estudiar la mineralización debe considerarse su interacción con la nitrificación. Ésta es una oxidación biológica del amonio hasta nitrato, efectuada por dos grupos de bacterias quimioautótrofas. El primero lo conforman bacterias del género *Nitrosomonas*, *Nitrosolobus* y *Nitrospira*, las que oxidan amonio sólo hasta nitrito. El segundo grupo son bacterias del género *Nitrobacter*, las que completan la oxidación hasta nitrato. La nitrificación depende entre otros factores, del pH, disponibilidad de amonio, humedad, temperatura, relación C:N, oxígeno y adecuada población microbiana en el suelo (Tisdale *et al.*, 1999).

Los factores mencionados anteriormente determinan que la mineralización sea un proceso muy variable en el tiempo y en el espacio, y por tanto, su dinámica es difícil de predecir. Sin embargo, cuando se consideran los aportes de nitrógeno provenientes de la mineralización de la materia orgánica en los modelos de recomendación de fertilizantes, se asume un valor promedio, ignorando la variabilidad espacial de la mineralización de N. El conocimiento de esta última es clave para la implementación de prácticas de manejo de nitrógeno sitio-específicas, las cuales han demostrado beneficios económicos y ambientales (Ortega *et al.*, 2002).

Se conoce que los contenidos de nitrógeno presentes en el suelo son relativamente bajos en relación con las cantidades requeridas por los cultivos; además el uso irracional de dicho elemento, sin el conocimiento previo de su dinámica, trae consigo graves consecuencias.

Debido a la influencia de estas diferencias agrológicas en la disponibilidad de nitrógeno en el suelo para las plantas, las necesidades esenciales de dicho nutriente por el cultivo del café y su empleo más eficiente, se realiza el presente estudio que consiste en valorar la producción neta de nitrógeno mineral en un sistema de café con presencia y ausencia de árboles de sombra.

II. OBJETIVOS

2.1 General

- ◆ Estimar la producción neta de nitrógeno mineral del suelo que ocurre en una plantación de café con presencia y ausencia de árboles de sombra.

2.2 Específicos

- ◆ Determinar el nitrógeno mineral neto, así como el contenido de las formas asimilables por la planta (amonio y nitrato).
- ◆ Conocer la producción de nitrógeno mineral neto en los sitios de calle e hilera.

III. HIPÓTESIS

3.1 Los sistemas de manejo de café afectan la mineralización neta del nitrógeno, tanto en calle como en hilera.

3.2 Los distintos manejos agronómicos en café no ejercen influencia en la mineralización neta del nitrógeno en los sitios de calle e hilera.

IV. REVISIÓN DE LITERATURA

4.1 Componentes del nitrógeno del suelo

4.1.1 Nitrógeno orgánico

Estiércol y plantas, microorganismos y animales muertos en descomposición, son importantes fuentes de nitrógeno para el suelo. Si bien, la mayor parte de este nitrógeno es insoluble y no está disponible de inmediato para que lo utilicen las plantas. Esta fracción orgánica se abastece también de este elemento a partir de microorganismos fijadores de N atmosférico en forma asimbiótica y de la inmovilización de la fracción soluble que realizan los microorganismos (Salisbury y Ross, 1994; Bertsch, 1995), y representa comúnmente, entre el 85 y el 95 % del N total (Fassbender, 1984).

4.1.2 Nitrógeno inorgánico

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

Los porcentajes de N mineral tienden a ser más altos en suelos de regiones áridas y semiáridas, y los valores menores corresponden a suelos volcánicos. El N inorgánico se presenta como óxido nitroso (N_2O), óxido nítrico (NO), dióxido de nitrógeno (NO_2^-), amoníaco (NH_3^+) en cantidades mínimas, además como amonio (NH_4^+), nitrito (NO_2^-) y nitratos (NO_3^-) (Fassbender y Bornemisza, 1987).

El N atmosférico existe en forma elemental libre (N_2) y en cualquiera de sus otras formas gaseosas (N_2O , NO, NO_2^- y NH_3^+).

Existen otras formas cristalinas inorgánicas, como las taranakitas (fosfatos amonicoferroaluminicos), que representan productos de transformación de fertilizantes fosfóricos (Bertsch, 1995). Se reconoce dentro del N inorgánico: una fracción soluble, donde se presentan los iones NH_4^+ y NO_3^- en la solución del suelo provenientes de la mineralización del nitrógeno orgánico y los fertilizantes.

4.2 Contenido de nitrógeno en el Suelo

El contenido de N total en los suelos presenta un amplio ámbito, pero es común el comprendido entre 0.2 y 0.7% para la denominada capa arable (Fassbender, 1984). El porcentaje tiende a disminuir al aumentar la profundidad del perfil. Dentro de los factores de formación del suelo, el clima es el que influye más directamente en el contenido total del N, cuyo porcentaje tiende a incrementarse al disminuir la temperatura y al aumentar la precipitación, dentro de ciertos límites.

El contenido de materia orgánica y N está relacionado con el origen de los suelos. Los suelos de las regiones bajas, en su mayoría, tienen un contenido de N de mediano a bajo. Los suelos de cenizas volcánicas se caracterizan por tener valores altos de N. Por ejemplo, en suelos de origen volcánico en América Central, en el horizonte A, se tienen valores de 0.4 a 0.5% de N. Además, está asociado en forma directa al C, en función de la relación C/N. Esta relación, en condiciones de suelo normal tiene un valor entre 10 y 20; en casos extremos puede llegar hasta 30. Suelos con alto contenido de materia orgánica, naturalmente, tienen un alto contenido de N. Un suelo con un contenido de materia orgánica mayor del 4% puede ser clasificado como un suelo altamente húmico (Fassbender, 1993).

4.3 Importancia del nitrógeno para las plantas

Entre los tres elementos (N, P, K) que se aplican en forma de fertilizantes comerciales, el nitrógeno parece ser el que produce los efectos más rápidos y más pronunciados, no solamente cuando se encuentra presente en exceso en el suelo, sino también cuando se aplica la proporción moderada. Tiende principalmente a fomentar el crecimiento de las partes aéreas de las plantas, y a dar a las hojas un color verde pronunciado. En todas las plantas el nitrógeno

produce un efecto que se podría llamar regulador, pues hasta cierto grado rige la asimilación del potasio, del ácido fosfórico y de otros constituyentes.

Giller y Wilson (1991) y Carvajal (1984), manifiestan que el nitrógeno es uno de los factores limitativos más comunes en la producción de café, situación que el caficultor tiene que corregir mediante el suministro oportuno de este nutrimento a las plantas en forma asimilable. Pese a que el nitrógeno constituye aproximadamente el 80 % de la atmósfera, en su forma molecular (N_2) es inerte y sólo es aprovechado por las plantas en forma mineral asociado a otros compuestos que dan origen a los iones amonio (NH_4^+) y nitrato (NO_3^-) o cuando es fijado biológicamente por microorganismos libres o simbióticos.

Las plantas que no reciben un aporte suficiente de N son de reducido desarrollo, incluso el sistema radical. Las hojas se vuelven amarillas o verde amarillentas, y en ciertas plantas tienden a caer. La adición de una pequeña cantidad de N asimilable, siendo constantes las demás condiciones, provocará un cambio notable, lo cual indica la actividad de ese elemento dentro de la planta. Se ha hecho notar su movilidad en el suelo al considerar el ciclo del N.

La importancia del nitrógeno desde el punto de vista bio-edafológico se comprende inmediatamente, ya que no sólo constituye un factor vital para el desarrollo de las plantas, sino que interviene decisivamente en las transformaciones orgánicas que se producen en el suelo, cuya regulación permitirá aprovechar debidamente dicho elemento. El nitrógeno contenido en la tierra está dotado de gran movilidad y pluralidad de formas en que se presenta, lo cual dificulta su control. Por ello se pierden considerables porcentajes de nitrógeno libre, que pasa a la atmósfera, y también en la de sales solubles que se eliminan en las aguas de drenaje.

Los abonos que contienen este elemento, especialmente los de efecto rápido son muy estimados por los agricultores, lo cual es debido a su acción espectacular sobre la planta y en especial sobre diferentes etapas de su ciclo vegetativo.

Debido a ese efecto aparentemente inmediato de la aplicación de compuestos asimilables de nitrógeno, la gente está predispuesta a atribuir casi demasiada importancia a ese elemento para conseguir un buen desarrollo de las plantas cultivadas; circunstancia infortunada, pues el

nitrógeno es caro y se pierde fácilmente en el suelo. Además entre los tres elementos fertilizantes es el único que, si se agrega en proporciones ligeramente excesivas, produce efectos posteriores perjudiciales en el cultivo. Hojas de un color verde muy oscuro, blandas y jugosas, son una indicación de un exceso de nitrógeno. Lyttleton y Buckman (1952), enumeran los principales efectos perjudiciales posibles debido a la presencia de cantidades relativamente grandes de este elemento, clasificándolos de la siguiente forma:

- a) El N puede retardar la madurez al fomentar un crecimiento vegetativo exagerado, que continúa por más tiempo que el normal para la madurez. Esto aumenta generalmente el peligro de los daños por las heladas a los cultivos.
- b) Puede disminuir la calidad. Esto se nota especialmente en ciertos granos y frutos.
- c) Puede disminuir la resistencia a las enfermedades. Se debe probablemente a una variación de las condiciones fisiológicas dentro de la planta y también a un adelgazamiento de las paredes celulares, que permiten una infección más fácil. Una proporción de nitrógeno mayor que la correspondiente a la capacidad fotosintética parece molestar la nutrición celular, y una vez que ha comenzado la infección ya casi no hay resistencia a la enfermedad.

4.4 Ciclo del nitrógeno

El ciclo del N en el suelo representa una parte muy pequeña del ciclo total del nitrógeno en la naturaleza. Del 98% del nitrógeno que se encuentra en la litosfera, solamente un 0.00014% se ubica en los suelos y una cantidad semejante participa en la biosfera. Sin embargo, como en esta parte participan todas sus formas (moleculares, orgánicas e inorgánicas) resulta un ciclo muy complejo y peculiar (Bertsch, 1995).

De acuerdo a Vitousek *et al.* (1997), la atmósfera terrestre posee un 78% de nitrógeno en forma de gas, pero la mayoría de las plantas y animales no pueden usar directamente este elemento del aire tal como lo hacen con el dióxido de carbono y el oxígeno. Las plantas deben esperar a que el nitrógeno sea fijado en forma de compuestos inorgánicos como amonio (NH_4^+) y nitratos (NO_3^-) que ellas puedan usar. La mayoría del nitrógeno orgánico, y especialmente el que cicla en los ecosistemas terrestres, no se encuentra disponible sino inmovilizado en la materia orgánica, parcialmente descompuesto en los restos de animales y

plantas que deben ser mineralizados por los microorganismos. El ciclo biogeoquímico del nitrógeno es el que comprende en su totalidad la circulación de este elemento químico en todas sus formas entre la biomasa, el mantillo, el suelo y las fuentes externas del ecosistema; es decir, comprende los procesos de absorción, acumulación, traslocación y redistribución interna del elemento en las plantas, así también comprenden los procesos de intercambio con la atmósfera (ganancias y pérdidas) y el suelo (residuos vegetales y su descomposición, escorrentía y lixiviación) (Fassbender, 1993).

El N sufre transformaciones en el suelo que dependen de varios factores, entre los que se incluyen humedad, temperatura, pH y aireación. Como resultado general, no existe una ganancia o pérdida neta de N en la naturaleza. El proceso total se conoce como Ciclo del Nitrógeno (figura 1).

En el ciclo del nitrógeno algunos productos provenientes de las transformaciones del N del suelo pueden conducir a que este elemento se pierda del agroecosistema por diferentes vías. Entre ellas están: la lixiviación, especialmente del N-NO_3^- , la volatilización del NH_4^+ y la desnitrificación con producción de gases (N_2O y N_2) hacia la atmósfera (Bertsch, 1995).

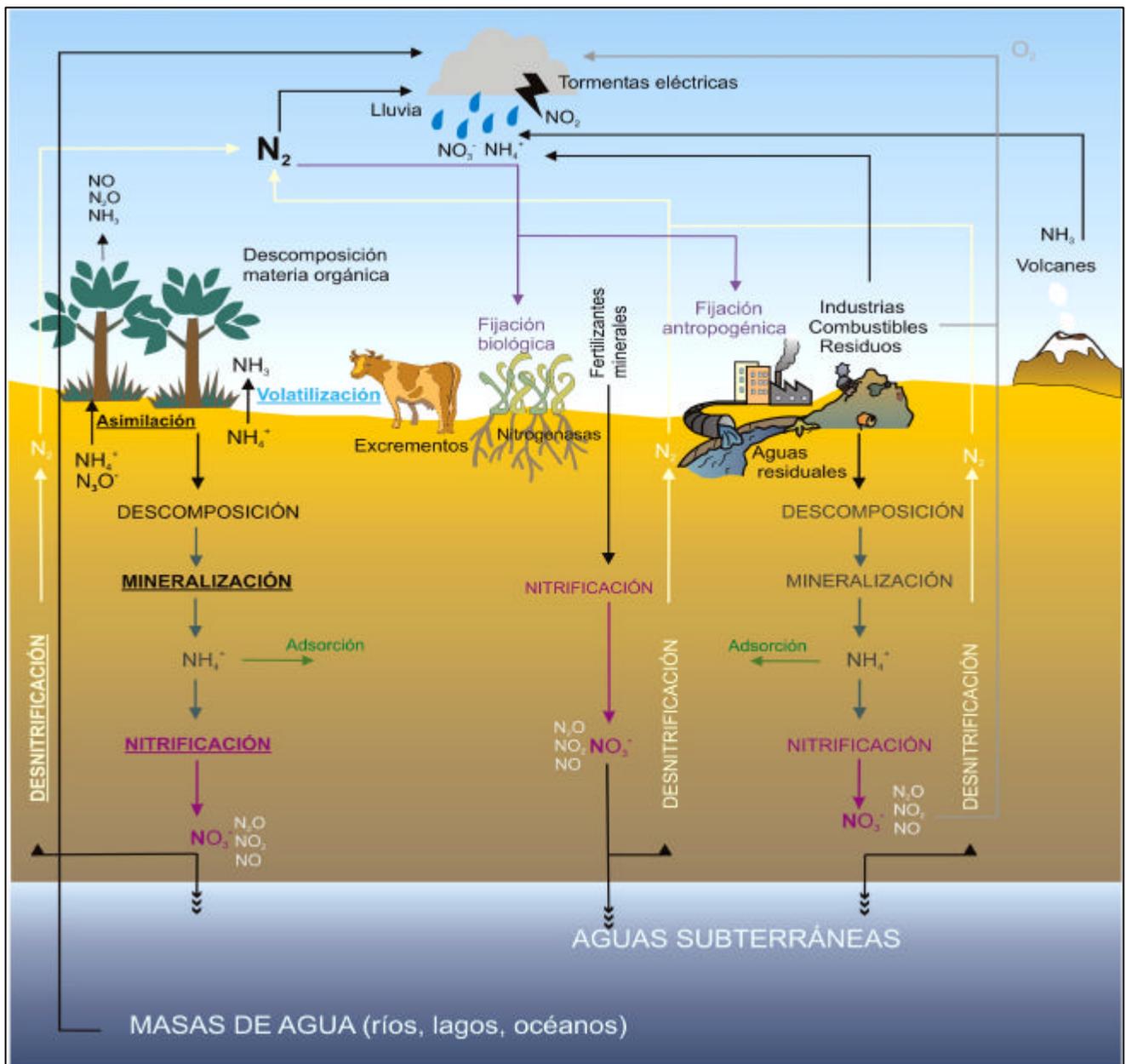


Figura 1. Ciclo del Nitrógeno.

Adaptado de Coyne, 1999.

4.4.1 El ciclo del nitrógeno en suelos agrícolas

El NH_4^+ en el suelo está sujeto a un proceso de transformación llamado nitrificación, pasando de NH_4^+ a NO_2^- y, posteriormente, a NO_3^- . Este ciclo está a cargo de una serie de bacterias llamadas *Nitrosomonas* y *Nitrobacter*. El proceso de NO_2^- a NO_3^- es rápido, donde las bacterias *Nitrobacter* presentan una notable avidez por el NO_2^- para luego transformarlo a

NO_3^- . Este proceso es muy favorable, debido a que los NO_2^- son tóxicos para las plantas (Fassbender, 1987).

Existen en el suelo microorganismos que presentan un ciclo interno de N, inmovilizan el NO_3^- para formar nuevamente sustancias orgánicas nitrogenadas. Las reservas de N orgánico alcanzan del 95 al 98% de N en el suelo (Fassbender, 1993), de ellos se forma paulatinamente NH_4^+ y NO_3^- , que son absorbidos por las plantas.

Existen plantas que presentan características genéticas de selectividad para la absorción de NH_4^+ y NO_3^- , aunque la mayoría de las especies son capaces de absorber ambas formas. Después de la absorción en la planta, se forman nuevamente sustancias orgánicas nitrogenadas, cerrándose prácticamente el ciclo suelo-planta. La absorción de NO_3^- implica que en la planta éste se tiene que reducir a NH_4^+ para poder ser utilizada en la formación de proteínas (Fassbender, 1993).

En el suelo se presenta una interacción entre un catión (NH_4^+) y los cambiadores del suelo (arcillas), las sustancias húmicas y los óxidos de hierro y aluminio, formándose una capa intercambiable, hasta cierto punto disponible para las plantas. Además, existe un equilibrio químico entre el NH_4^+ y el complejo de intercambio. En el momento en que la planta absorbe NH_4^+ , se libera del complejo coloidal NH_4^+ para compensar la pérdida debida a la absorción, existiendo de esta manera una disponibilidad continua de NH_4^+ .

El NO_3^- puede ser también adsorbido en la superficie coloidal, siempre y cuando ésta tenga cargas positivas que atraigan a las negativas del NO_3^- .

El aumento de las reservas de NO_3^- y el NH_4^+ es altamente dependiente del pH. Con valores bajos de pH se generan cargas electropositivas donde se adsorben los NO_3^- . Existe un punto en el cual las cargas positivas y negativas de los complejos de intercambio desaparecen, presentándose entonces coagulación con un rápido lavado de los NO_3^- a través del perfil del suelo, perdiéndose así el N.

Existen en la naturaleza procesos de fijación de N que se producen en función de diferentes fenómenos. Así, se tiene una acumulación del N atmosférico en el suelo en función de las descargas eléctricas, que es el proceso que a largo plazo ha contribuido más a la acumulación del N en los suelos y en los ecosistemas. Durante las tormentas, los rayos que tienen temperaturas y valores de energía muy altos, llevan a la oxidación del N_2 de la atmósfera formándose los primeros óxidos que aparecen en el aire.

Fassbender (1984) cataloga los diferentes procesos en que el agua de lluvia adiciona el N atmosférico al suelo de la siguiente manera: a) fijación eléctrica del nitrógeno atmosférico; b) fijación fotoquímica del nitrógeno atmosférico y fotooxidación del amonio; c) adsorción del nitrógeno orgánico en partículas de polvo y d) contaminación industrial mediante gases y humo.

El N contenido en el agua de lluvia generalmente se encuentra en las formas de nitrato o amoniacal, de modo que es fácilmente asimilable por las plantas. Las cantidades que se incorporan al suelo en esa forma son variables, fluctuando de acuerdo a la estación y al lugar. Esta incorporación de N es mayor en las regiones tropicales que en las templadas húmedas, y mayor en estas últimas que en los climas semiáridos. Aparentemente, la proporción de N amoniacal incorporado al suelo por el agua de lluvia es siempre mayor, por lo menos en las regiones templadas que el adicionado en forma de nitrato. También puede verse que si bien la cantidad de nitrógeno de nitratos es aproximadamente igual para casi todos esos lugares, la forma amoniacal muestra grandes variaciones (Lyttleton y Buckman, 1952).

Considerando los datos en conjunto, Lyttleton y Buckman (1952) suponen que en un clima templado húmedo anualmente se incorporan por hectárea de terreno traídos en el agua de lluvia 5 kg de N- NH_4^+ y 1.7 kg de N- NO_3^- , teniendo en cuenta que hay una cierta pérdida por escurrimiento, probablemente se incorporan al suelo unos 5.7 kg N $ha^{-1}año^{-1}$.

Una incorporación anual de 5.7 kg de N en forma fácilmente asimilable, por hectárea de terreno, ya constituye una ayuda para la conservación de la fertilidad del suelo, pues equivale a unos 35 kg de nitrato de sodio comercial. Esta adición por parte de la lluvia casi compensa la

eliminación anual de N en el agua de drenaje de un suelo sometido a una rotación común, y la cubre casi con exceso cuando el suelo se encuentra continuamente con cubierta.

4.4.1.1 Mineralización del nitrógeno

La mayor proporción del nitrógeno del suelo se encuentra asociado a la materia orgánica en forma de aminoácidos o proteínas. Este N orgánico sufre una serie de transformaciones en el suelo que lo llevan a N mineral, en la cual se dan básicamente tres procesos de la mineralización: Aminación, Amonificación; estos primeros procesos por lo general se conocen como Amonificación, es decir, que el proceso de mineralización (figura 2) conlleva a la formación de NH_4^+ que luego puede ser transformado en nitratos (NO_3^-) a través de la Nitrificación. Estas dos formas de N mineral NH_4^+ y NO_3^- son las que las plantas absorben de la solución del suelo para su nutrición (Solórzano 1997; Bertsch, 1995).

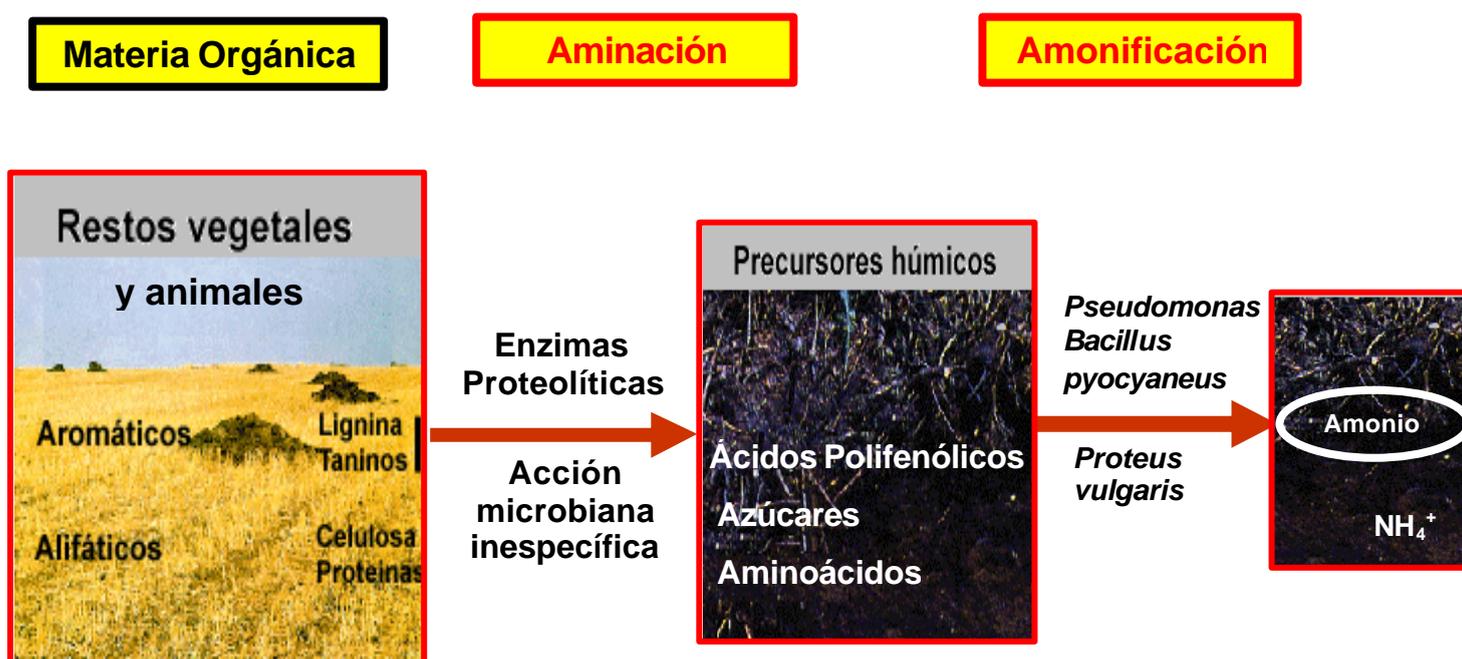


Figura 2. Mineralización del nitrógeno orgánico.

Adaptado de Fassbender, 1984.

El proceso de mineralización es afectado por el clima (temperatura, humedad), el suelo (mineralogía de arcillas, pH, aireación), la calidad de la materia orgánica (relación C/N, presencia de taninos), macrofauna, microorganismos y hasta manejo del cultivo.

La mineralización se detiene en ambiente seco por la muerte de las bacterias nitrificantes, sin embargo, puede ocurrir con humedades muy bajas, debido a que los microorganismos son más hábiles extractantes de agua que las plantas (Reynolds-Vargas *et al.* 1994). También, puede ocurrir bajo condiciones de inundación, pero se detiene en la etapa de amonificación por cuanto solamente microorganismos aeróbicos pueden convertir amonio en nitratos. Bajo condiciones de periodos alternos de humedecimiento y secado, la mineralización es más rápida que bajo condiciones óptimas constantes de humedad. Este fenómeno probablemente está asociado con una población microbiana más activa al humedecerse el suelo después de un periodo seco, o con una mayor accesibilidad del humus a los microorganismos por la contracción e hinchamiento de los minerales de la arcilla o de los revestimientos de óxidos de Fe y Al. En forma general una relación C/N baja tiende a favorecer la mineralización, en tanto que relaciones mayores de 25 conducen a una lenta mineralización o bien a la inmovilización del N (Bertsch, 1995).

4.4.1.1.1 Aminación

En primer lugar, las enzimas proteolíticas actúan sobre las macromoléculas de las proteínas, los ácidos nucleicos y otros compuestos nitrogenados hasta descomponerlas en aminoácidos en la primera etapa llamada de aminización (Arana, 2003).

Las proteínas y compuestos relacionados, que son los que forman la mayor parte de la materia orgánica nitrogenada que se incorpora comúnmente al suelo, no pueden ser absorbidas por las plantas superiores, pero pueden ser utilizadas por la fauna y la flora del suelo, siendo atacados estos compuestos orgánicos nitrogenados, cuando las condiciones son netamente favorables, por una gran variedad de organismos. En los suelos cultivados, la vida animal no es tan activa, salvo las lombrices, entonces, se debe a las bacterias el trabajo fundamental de disolución y dislocación molecular interviniendo, entre las aeróbicas el *Bacillus pyocyaneus*, *B. fluorescens*, *Proteus vulgaris* y *Pseudomonas*, así como muchas especies anaerobias, en especial el *B. putrificus*, *B. proteobacter* y *Clostridium*. De menor importancia es la intervención de algunos hongos cuyas especies pertenecen a los *Mucor*, *Fusarium*, los cuales juntamente con los *Actinomicetes*, predominan en las fases avanzadas de la descomposición.

Los fenómenos que se producen son muy complejos, como resultado de estas acciones enzimáticas dan lugar a muchas sustancias, ya que son muy diferentes los seres que intervienen.

Lyttleton y Buckman (1952) y Mela (1963), determinan el posible destino que el N puede tener:

- Ser sintetizado por los organismos (inmovilización) de funciones generales formando tejidos y contenidos celulares complejos, los cuales parecen encontrar en estos componentes más favorables condiciones para su metabolismo, por lo que los prefieren a otros proteicos, pues requieren escasa energía para su integración. Al morir los microorganismos pasan sus tejidos a incrementar la masa de materias orgánicas nitrogenadas.
- Formar complejos organominerales.
- Ser incorporado en la fracción del humus.
- Ser utilizado por las plantas.
- Dar lugar a N libre, que pasa a la atmósfera del suelo posteriormente al aire libre.

La absorción de energía por los organismos del suelo y la incorporación de materiales en sus tejidos, explica el fenómeno, y el N que no es inmediatamente utilizado constituye en el suelo un residuo o excedente, temporalmente por lo menos.

Las condiciones que favorecen la aminación parecen ser las mismas que las que contribuyen al buen desarrollo vegetativo de la planta en lo que concierne a la temperatura, humedad y aireación, siendo muy conveniente el drenaje y la presencia de calcio activo, pues en los suelos ácidos no existen animales ni bacterias, de las cuales nos interesan especialmente las aeróbicas, para cuyo desarrollo se necesita mantener la estructura adecuada para el fácil acceso del oxígeno, ya que es el que existe libre en el suelo y que basta generalmente para sostener tan considerable masa microbiana. Una humedad óptima para las plantas superiores parece favorecer también la fauna y la flora que intervienen en la disolución. En realidad, el carácter de esos procesos parece ser determinado más por las condiciones del suelo que por los organismos particulares presentes, de funciones generales.

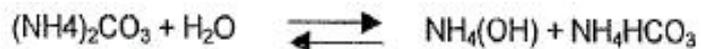
4.4.1.1.2 Amonificación

La conversión de sustancias más complejas a NH_4^+ se denomina amonificación. La amonificación de los aminoácidos se produce bioquímicamente a través de procesos de desaminación y descarboxilación, y conduce a la formación de amonio, que ya dentro de la solución del suelo pasa a comportarse como un catión corriente. El amonio resultante de esta etapa puede ser: absorbido por las plantas; adsorbido por el complejo coloidal inorgánico y orgánico; fijado por los minerales; inmovilizado por microorganismos; lixiviado a través del suelo; oxidado hasta el nivel de nitratos (Fassbender y Bornemisza, 1987; Bertsch, 1995).

A partir de la urea, que es una de las formas de fertilizantes nitrogenados más utilizadas, se da una hidrólisis por medio de las Urobacterias:



La cual se da en presencia o ausencia de oxígeno, el carbonato de amonio formado se hidroliza fácilmente por provenir de una sal de ácido y base débil (Agrawal *et al*, 1995):



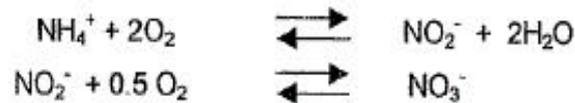
La volatilización del amonio puede ser un proceso estrictamente inorgánico. El hidróxido de amonio formado se disocia en amoníaco y agua (Fassbender y Bornemisza, 1987):



La amonificación comprende los primeros procesos de transformación, hasta que las sustancias orgánicas llegan a presentarse como ión amonio. El amonio resultante de esta etapa puede ser absorbido por las plantas; fijado por los minerales; inmovilizado por microorganismos; lixiviados a través del suelo; oxidados hasta el nivel de nitratos (Fassbender y Bornemisza, 1987; Lyttleton y Buckman, 1952; Mela, 1963).

4.4.1.1.3 Nitrificación

La nitrificación comprende la transformación del amonio en nitratos, pasando previamente por la forma de nitritos. El amonio resultante de la mineralización del N orgánico y/o aplicado en forma de fertilizante por acción de las bacterias *Nitrosomonas* y *Nitrobacter* es oxidado en dos distintas fases, respectivamente:



Los organismos nitrificantes obtienen su energía de la oxidación del amonio y los iones de nitrito (Russell, 1976):

- La oxidación del amonio a iones de nitrito se da a través de la etapa hidroxilamina ($\text{NH}_2\bullet\text{OH}$); ésta es la única sustancia, casi completamente demostrado, que toma parte en el proceso como intermediaria.
- Oxidación de la hidroxilamina a nitrito, a través de la nitrohidroxilamina.
- Oxidación del nitrito a nitrato, que es, probablemente, una reacción de deshidrogenación.

Estas dos reacciones son muy lentas y se dan a temperaturas no muy altas. La velocidad de la reacción aumenta de los 26 °C y disminuye a 9 °C (Agrawal, 1995).

El nitrato representa la fase más altamente oxidada en el ciclo del nitrógeno y alcanza normalmente, concentraciones importantes en las etapas finales de la oxidación biológica.

La producción de nitratos es el final del proceso del que se vale la naturaleza para facilitar a las plantas su alimentación nitrogenada, por lo cual la cantidad que de aquéllo se produzca puede servir de orientación para un primer avance indicador de la fertilidad del suelo, y actuando las bacterias muy rápidamente sobre las sales amoniacaes, es evidente que de la velocidad con que éstas se producen dependerá la acumulación de nitratos (Mela, 1963).

4.4.1.1.3.1 Condiciones de suelo que afectan la nitrificación

a) Aireación

Como la nitrificación es un proceso de oxidación aeróbica, cualquier acción que aumente la aireación del suelo tiende a fomentarla. Como medios para fomentar la nitrificación se reconocen las labores de preparación del suelo, siempre que éstas no perjudiquen la porosidad del mismo. Casi podría decirse que las aporcaduras sobre las bacterias nitrificantes son, en muchos casos, tan importantes como la destrucción de malezas y la conservación de un estado físico deseable en el suelo por esas operaciones de cultivo.

b) Temperatura

La temperatura más favorable para el proceso de la nitrificación es de 27 a 32 °C. La nitrificación no tiene lugar a la temperatura de congelación del agua, pero comienza alrededor de los 4.5°C y se intensifica gradualmente hasta llegar a la temperatura óptima.

c) Humedad

La velocidad con que se realiza la nitrificación en un suelo depende en grado considerable del contenido de agua, y el proceso es retardado por contenidos demasiados bajos y también demasiados elevados de humedad. Prácticamente puede decirse que el contenido óptimo de humedad de un suelo para las plantas superiores lo es también para la nitrificación. Esto quiere decir, para los suelos comunes, que el agua superflua o de drenaje debe desaparecer de los horizontes superficiales y de la parte superior del subsuelo. En esa condición, el espacio de poros del suelo estaría ocupado por agua probablemente en un 50%, y, de acuerdo con resultados del estudio realizado por Reynolds-Vargas *et al.* (1994), la nitrificación, sin embargo, puede continuar aún con contenidos de agua menores que el del punto de marchitamiento.

d) Cal activa

Es necesaria la presencia de una base para crear un pH adecuado, la que se combina con el ácido nítrico evitando que la nitrificación se interrumpa al elevarse demasiado el pH. Es muy común observar que la cal aplicada estimula la nitrificación en los suelos, aún en aquéllos que ya contenían una proporción adecuada de calcio activo. Aparentemente, el proceso de oxidación exige la presencia de bases activas. El potasio, el magnesio y el amonio facilitan la reacción, pero el calcio es el que da los mejores resultados. Esto explica la nitrificación pequeña que se observa en los suelos minerales ácidos y la aparente sensibilidad de los organismos a un pH bajo. Pero en realidad, la acidez, dentro de límites razonables, parece tener otra influencia sobre la nitrificación, siempre que haya presente una proporción adecuada de calcio, especialmente en los suelos turbosos. Estos últimos muestran a veces una notable acumulación de nitratos a un pH menor que 5. Esto se debe a su elevada capacidad total de intercambio y a la consiguiente presencia de cantidades muy elevadas de calcio activo a pesar del bajo porcentaje de saturación de bases.

e) Fertilizantes

Pequeñas cantidades de muchas sales estimulan la nitrificación. Los fosfatos son muy eficientes en la estimulación de todos los tipos de organismos del suelo, incluso los nitrificadores, y es tan grande la cantidad de fósforo empleada en esta forma que puede resultar una deficiencia para las plantas superiores. Sin duda sucede lo mismo con las sales de potasio. En general, la estimulación de las bacterias del suelo por la aplicación de fertilizantes está asociada con la que se observa en las plantas superiores, de modo que una fertilización racional fomenta la nitrificación y otras actividades microbianas, lo mismo que el crecimiento de las plantas cultivadas. Todos los que sirvan de alimento a los microorganismos intensifican considerablemente su actividad, y como esto ocurre con casi todos los abonos, puede decirse con carácter general que su aplicación intensifica el proceso nitrificador, con el consiguiente incremento en el desarrollo de los vegetales, si bien existen casos en que puede ser notablemente perjudicado por la excesiva actividad de los microorganismos que fijan grandes cantidades de nitrógeno, fósforo y potasio, que de momento no pueden ser utilizadas por las plantas. Cuanto se ha dicho, se refiere a porcentajes adecuados, ya que si pasan determinados

límites pueden producir efectos contraproducentes, como ocurre cuando se añaden cantidades excesivas de nitrato sódico. En esta propiedad se basan las adiciones de dicho abono para reducir la nitrificación.

f) Relación carbono/nitrógeno (C/N)

El tejido vegetal original que se incorpora al suelo tiene una composición variable, como ya se ha hecho notar, siendo la relación C/N 1-20 ó 30 en las leguminosas y el estiércol hasta 1-70 ó más en algunas pajas. Se encuentran todos los valores entre esos dos extremos. La relación C/N de los cuerpos de los microorganismos, por otro lado, es más constante y también mayor, generalmente 1-4 ó 1-9.

La adición al suelo de azúcares, celulosas u otras sustancias de fácil descomposición de relación C/N baja provoca, si las condiciones son favorables para la descomposición, una desaparición total o parcial de los nitratos originalmente presentes. La desaparición de los nitratos del suelo en estos casos no quiere decir necesariamente que no se formen nitratos; pero si se forman, son asimilados a medida que se producen. Los hidratos de carbono constituyen una buena fuente de energía para los organismos de funciones generales del suelo y, en condiciones favorables, se inicia una enorme multiplicación. Para la síntesis del nuevo protoplasma se necesita nitrógeno, de modo que se utiliza todo el que se forma en el suelo, y aunque se formen nitratos no hay oportunidad de que se acumulen. Probablemente hay una pausa en la nitrificación, por falta de nitrógeno amoniacal, pues este también ha sido utilizado por los organismos que se multiplican. De modo que las plantas superiores no podrían obtener nitrógeno que es utilizado por los microorganismos.

Si la relación C/N de la materia orgánica del suelo es baja, la actividad de los organismos de descomposición es intensa y eleva la demanda de nitrógeno. Habrá poco N amoniacal disponible para la nitrificación y los nitratos aparecerán en muy pequeña proporción, si es que aparecen. De modo que las plantas superiores que crecen en ese suelo pueden sufrir una falta de N asimilable. Una relación C/N baja equivale entonces a una activa competencia del N entre los diferentes organismos del suelo y también entre éstos y las plantas superiores.

Un segundo aspecto de la relación C/N se refiere a la conservación del humus en el suelo. Puesto que durante la disolución rápida de la materia orgánica el N es fuertemente retenido en el suelo por los microorganismos, lignina y arcilla, y el carbono disminuye hasta encontrarse en una relación aproximadamente constante con él, el contenido de N del suelo es el que determina realmente la cantidad de carbono orgánico presente. Así, cuanto mayor es la proporción de N en el tejido original mayor será la acumulación de carbono orgánico; y como existe una relación bastante definida (1:1724) entre el carbono orgánico y la materia orgánica del suelo, la proporción de esta última que puede conservarse en un suelo depende entonces de la cantidad de N presente. Esta relación microbiana entre el N del suelo y la conservación de la materia orgánica es consistente.

Debe mencionarse otro aspecto de la influencia de la relación C/N. Hay una cierta evidencia de que las raíces de las plantas exudan o desprenden materia orgánica con un contenido muy elevado de carbono. De modo que en la proximidad de las raíces la relación C/N se hace menor y aumenta la actividad microbiana, con lo cual desaparecen los nitratos de ciertas zonas críticas. Esa conclusión sería apoyada por la presencia de una mayor cantidad de organismos cerca de las raíces de las plantas, y también por el mayor desprendimiento de CO₂ en los suelos cultivados que en los no cultivados. Aparentemente, las raíces de las plantas estimulan localmente la flora heterótrofa del suelo, con lo cual retardan la acumulación de nitratos. En esa forma indirecta las plantas superiores pueden fomentar apreciablemente la actividad microbiana. A medida que se pierde bióxido de carbono y la relación C/N se hace mayor, disminuye la cantidad de carbono utilizable y se reduce mucho la actividad de los organismos heterótrofos de funciones generales. Entonces disminuye apreciablemente la demanda microbiana de N, y como consecuencia de ello comienza a aparecer el amonio como producto secundario. Sin las demás condiciones favorables puede haber entonces una nitrificación y aparecer N en forma de nitratos.

Está bastante establecido que la relación C/N tiende a ser menor en los suelos áridos que en los de las regiones húmedas cuando las temperaturas son comparables, y menor en las regiones cálidas que en las más frías, siempre que la precipitación sea aproximadamente igual en ambas. Además, la relación es en general mayor en los subsuelos que en las capas superficiales correspondientes.

g) Nitratos y cloruro de sodio

Cuando se añaden nitratos al suelo en plena nitrificación ésta disminuye en intensidad a medida que aumenta la cantidad añadida, lo cual nos facilita el medio de regular dicho proceso. Ocurre, sin embargo, que el fenómeno nítrico se habitúa a la acción del nitrato, terminando por desarrollarse normalmente lo que impide que, de momento, se reduzca tanto más su actividad cuanto mayor sea la cantidad añadida de aquél.

Los efectos del cloruro de sodio no son apreciables cuando su porcentaje es pequeño o moderado, pero reduce notablemente la nitrificación si la sal abunda en el suelo. De aquí la escasa actividad con que dicho proceso actúa en los saladares.

h) Reductores de la nitrificación

La tasa de nitrificación puede ser reducida por varias sustancias tóxicas. El amoníaco por sí mismo es tóxico para ambos grupos de microorganismos nitrificantes, sin embargo, lo es aún más para las *Nitrobacter* que para el grupo de las *Nitrosomonas*. Por tanto, altas concentraciones de urea impiden la acumulación de nitritos, particularmente en suelos neutros o alcalinos de baja capacidad de intercambio catiónico en climas templados (Russell, 1976).

La adición de carbonato de calcio (Ca CO_3) para amortiguar un poco el suelo y reducir el aumento del pH, reducirá la concentración de nitritos en el mismo; y suelos de textura media o fina y con una adecuada capacidad de intercambio catiónico adsorben los iones de amoníaco y amonio disminuyendo el riesgo de la acumulación excesiva de nitritos cuando la urea es usada como fertilizante (Russell, 1976).

Por otro lado, existe un número de productos químicos comerciales que, según Russell (1976) parece inhibir la oxidación del amonio en la etapa de oxidación de la hidroxilamina:

- N-serve
- 2-cloro-6-triclorometil piridina

4.4.1.2 Nitrógeno potencialmente mineralizable

Dada la importancia que posee el N en la nutrición de las plantas, es necesario desarrollar procedimientos que permitan determinar el nitrógeno potencialmente mineralizable, es decir, el nitrógeno orgánico que se mineralizará durante el período de cultivo, que con toda probabilidad interviene en la nutrición de la planta.

La cantidad total del N mineral en el suelo resulta de la diferencia entre la tasa en que es producido de las reservas de materia orgánica del suelo y la tasa en que es removido por lixiviación, por el crecimiento de los cultivos y por otras vías de pérdida en que intervienen los microorganismos del suelo; y la proporción de nitrato y amonio depende, asimismo, de la tasa de oxidación del amonio a nitrato, la extracción de nitratos por la planta y las pérdidas de nitrato por lixiviación (Russell, 1976).

En la reposición de nitrógeno para los cultivos, el nitrógeno orgánico que se mineraliza durante el período del mismo es todavía más importante que el N mineral. En el suelo, tienen lugar procesos de mineralización de nitrógeno orgánico que están directamente relacionados con la relación C/N. Cuando dicha relación es elevada, como es el caso de la paja, los microorganismos necesitan nitrógeno adicional, cuya asimilación les permite formar sus propias proteínas. Este proceso, origina un descenso temporal en la concentración de NO_3^- (inmovilización), lo que demuestra que la relación C/N juega un papel crucial en relación con el nitrógeno orgánico potencialmente asimilable (Hütsch, 1990).

Las proteínas y péptidos adsorbidos a los coloides del suelo, constituyen una importante fuente de nitrógeno orgánico fácilmente mineralizable y de acuerdo a diversos autores (Loll *et al.*, 1983; Hütsch, 1990), la fuerza de adsorción de estos compuestos, es de naturaleza electrostática.

Por otra parte, la textura del suelo, puede tener alguna influencia sobre los mecanismos que intervienen en la disponibilidad del nitrógeno. Los suelos arenosos, se caracterizan porque en

ellos tiene lugar una rápida mineralización del nitrógeno proteico transformándose en nitratos, preferentemente durante los meses de verano, pudiendo ser lixiviado posteriormente con las lluvias de invierno, mientras que en los suelos arcillosos, este proceso es mucho más lento.

En consecuencia, la medida del nitrógeno potencialmente asimilable previa al cultivo, tiene dos componentes: la fracción de nitrógeno mineral y la de nitrógeno orgánico fácilmente mineralizable. A su vez en este último, se consideran dos aspectos: primero, estaría basado en la determinación de los compuestos nitrogenados de bajo peso molecular que son fácilmente mineralizables (aminoácidos, aminas, etc.), como un índice del que se mineralizará durante el desarrollo del cultivo; mientras que el segundo, se refiere a la necesidad de tomar en consideración las condiciones en las que tendrá lugar la mineralización. Algunas de estas condiciones, pueden ser establecidas antes del comienzo del cultivo, tales como: el pH del suelo y la relación C/N, mientras que otras, como las condiciones climáticas, presentan mayor dificultad para poderse establecer con anterioridad. Sin embargo, pueden definirse en gran medida, por el periodo del año en el que tendrá lugar el cultivo (verano o invierno) o bien por las condiciones de explotación (aplicación de riegos).

Entre las técnicas capaces de facilitar información sobre el nitrógeno potencialmente mineralizable, se cita el método de incubación propuesto por Stanford y Smith (1972), que presta información acerca de la velocidad de mineralización del nitrógeno en el suelo, y el modelo de Anderson e Ingram (1993), que indica que bajo condiciones *in vitro* el proceso de mineralización del nitrógeno se puede realizar bajo incubación en el laboratorio, siendo un método que puede utilizarse para cuantificar la mineralización neta.

Para el proceso de la mineralización del nitrógeno en incubación, la humedad de una muestra compuesta de suelo proveniente del campo deberá estar a capacidad de campo, la cual provee una estimación de la mineralización bajo condiciones óptimas y refleja el efecto de la calidad del sustrato sobre la mineralización (Vitousek y Matson, 1984).

Las tasas de mineralización, nitrificación e inmovilización del nitrógeno en el suelo constituyen parámetros de importancia en la caracterización de la disponibilidad del nutriente

para los cultivos. Así, pues, el conocimiento de las tasas de mineralización es necesario, en este sentido, para elaborar estrategias adecuadas de reposición del nutriente.

Anderson e Ingram (1993), señalan que la mineralización y nitrificación neta es calculada como la diferencia en N mineral entre dos períodos de tiempo ($t_1 - t_0$), y los resultados son expresados, preferentemente, como $\mu\text{g N/g}$ peso suelo seco /14 días.

Babbar y Zak (1994), encontraron variaciones respecto a la mineralización de N y a la nitrificación neta. Ambos procesos mostraron variaciones temporales marcadas; el promedio de la tasa de mineralización fue de 14.8 g N/ m^2 /año en sistemas con sombra, mientras que en las plantaciones sin sombra contabilizó 11.1 g N/ m^2 / año.

Tasas de mineralización reportadas por Reynolds-Vargas *et al.* (1994), de muestras provenientes de suelos de tres lugares (Valle Central, Costa Rica) mostraron promedios entre 39.9 y $54.3 \mu\text{g N g}^{-1}$ a los 30 días. Asimismo, Montagnini y Buschbacher (1989), reportaron tasas de mineralización y nitrificación en los horizontes superficiales de Oxisoles y Ultisoles (0-10 cm), de muestras colectadas durante la época lluviosa en la cuenca del Río Negro en Venezuela, cuyos promedios estaban entre 3.5 y $23.2 \mu\text{g g}^{-1}$ a los 30 días; sin embargo, Vitousek y Denslow (1986), en un estudio en tierras bajas del Atlántico de Costa Rica, estimaron mayores tasas de mineralización y nitrificación, en un rango de 15 a $65 \mu\text{g g}^{-1}$ a los 30 días.

4.4.1.2.1 Transformaciones del N-NO₃⁻

El N-NO₃⁻ del suelo puede sufrir cuatro transformaciones distintas:

- ser sintetizado por los microorganismos,
- ser sintetizado por las plantas superiores,
- perderse en el agua de drenaje,
- salir del ciclo en ciertas condiciones, por volatilización.

Se ha considerado la asimilación de N-NO_3^- por los microorganismos del suelo y por las plantas superiores; sin embargo, hay aspectos que cabe destacar:

a) Alimentación de los microorganismos

En ciertos momentos la microflora del suelo es tan voraz que necesita grandes cantidades de nitrógeno y es probable que consuma una proporción elevada de los nitratos elaborados durante el año. De este modo las plantas superiores se alimentan con un nitrógeno residual o secundario, pero además disponen solamente del que han dejado la flora y la fauna del suelo, de funciones generales. Sin duda, este nitrógeno es pequeño comparado con el total que en la época de crecimiento pasa por las formas amino, amoniacal y de nitratos.

b) Alimentación de las plantas

Es sabido que los nitratos constituyen la aportación más importante para la alimentación de las plantas, pues a su gran solubilidad se unen la preferencia que hacia ellos sienten los vegetales superiores, los cuales, si bien absorben en ciertos casos las sales amoniacales, prefieren casi siempre los nitratos, hasta el punto de que la mayoría de aquéllas han de sufrir la nitrificación antes de pasar a la planta, siendo excepciones el laurel y otras especies propias de suelos ácidos, algunos árboles y gran parte de los vegetales en la primera fase de su desarrollo. Sin embargo, la flora microbiana y la vegetación espontánea pueden consumir tales cantidades de nitrógeno que el restante sea insuficiente para cubrir las necesidades de las plantas.

c) Drenaje o lixiviación¹

d) Volatilización

Corresponden a las pérdidas de nitrógeno inorgánico, principalmente del amonio, en forma de gas amoníaco hacia la atmósfera por medios estrictamente químicos. El hidróxido de amonio formado se disocia en amoníaco y agua (Fassbender y Bornemisza, 1987).

¹ Ver acápite 4.4.2.3.

4.4.2 Pérdidas de N del suelo

4.4.2.1 Desnitrificación

La fuente más importante de pérdida del N del suelo en forma gaseosa es la desnitrificación, que consiste en la reducción de los nitratos a óxido nitroso (N_2O) con la consecuente liberación del N en su forma elemental gaseosa (N_2). Esto ocurre frecuentemente en suelos que no presentan un alto grado de acidez, con valores pH arriba de 5, bajo condiciones de poca aireación y en presencia de una población activa de microorganismos que, por tanto, este proceso resulta importante durante períodos con altas precipitaciones en suelos con temperaturas elevadas y con un alto contenido de materia orgánica (Russell, 1976).

4.4.2.2 Inmovilización

El N puede también pasar de una forma inorgánica a una forma orgánica. Este proceso se llama inmovilización y es el reverso de la mineralización. Los microorganismos descomponen vigorosamente la nueva fuente de energía presente en los residuos orgánicos, pero al mismo tiempo necesitan N para formar las proteínas de sus cuerpos. Cuando el contenido de N en los residuos es bajo, los microorganismos utilizan el N inorgánico del suelo para satisfacer sus necesidades. De esta forma el N inorgánico del suelo es transformado en N orgánico presente en las proteínas de los microorganismos del suelo. Esta forma de N no es inmediatamente disponible para el crecimiento de las plantas, pero mucho de este N regresa gradualmente a forma disponible a medida que los microorganismos mueren y sus cuerpos se descomponen. En este proceso el N inorgánico es incorporado e inmovilizado temporalmente en los microorganismos (Fassbender y Bornemisza, 1987).

La mineralización y la inmovilización ocurren simultáneamente en el suelo. El cambio de un suelo a dominancia de formas orgánicas o inorgánicas de N está gobernado principalmente por la relación C/N de la materia orgánica que se está descomponiendo. Los materiales con una relación C/N amplia (mayor que 30:1) favorecen la inmovilización (Bertsch, 1995).

4.4.2.3 Lixiviación

La pérdida de nitrato por lixiviación en el perfil del suelo fuera de la zona radical es un proceso complejo. En algunos suelos puede tardar unos pocos años para que el nitrato se lixivie hacia aguas subterráneas. La cantidad de nitrato presente en el suelo está siempre cambiando y, para que se produzca la lixiviación, más agua debe infiltrar el suelo que la que se pierde por evapotranspiración.

Entre los factores que afectan el proceso de lixiviación de N-NO_3^- están: las propiedades del suelo, topografía, clima, tipo de crecimiento del cultivo y las prácticas usadas en el manejo del sistema.

El manejo del N enfocado en minimizar las pérdidas de N-NO_3^- en un cultivo en hileras está basado en un simple concepto: el exceso de NO_3^- en la zona radical debe ser evitado en momentos en que el suelo es vulnerable a la lixiviación por exceso de agua o riego; teóricamente, todas las fuentes de N disponible a la planta son tomadas en cuenta y que son suficientes para maximizar el rendimiento del cultivo (Keeney, 1982, citado por Smith y Cassel, 1991).

La formación de las reservas de NO_3^- es altamente dependiente del pH. Con valores bajos de pH se generan cargas electropositivas donde se adsorben los NO_3^- . Existe un punto en el cual las cargas positivas y negativas de los complejos de intercambio desaparecen, presentándose entonces una coagulación con un rápido lavado de los NO_3^- a través del perfil del suelo, perdiéndose así el N (Smith y Cassel, 1991).

4.4.2.4 Saturación

Existen límites en la forma cómo el crecimiento de las plantas puede ser aumentado por la fertilización nitrogenada. En un determinado momento, cuando las deficiencias naturales de nitrógeno en un ecosistema son abastecidas, el crecimiento de la planta comienza a verse limitado por otras fuentes tales como el fósforo, el calcio y el agua. Cuando la vegetación ya no puede soportar más adiciones de nitrógeno, el ecosistema alcanza un estado descrito como

“saturación de nitrógeno”. En teoría, cuando un ecosistema es totalmente saturado con nitrógeno y sus suelos, plantas y microorganismos no pueden usar o retener más nitrógeno, todos los nuevos depósitos serán dispersados hacia las corrientes, aguas subterráneas y a la atmósfera. La saturación de nitrógeno tiene consecuencias dañinas para la salud y funcionamiento de los ecosistemas. Estos impactos fueron observados en Europa casi dos décadas atrás cuando los científicos identificaron incrementos significativos de la concentración de nitratos en lagos y corrientes, y también, amarillamiento y pérdida de algunos bosques de coníferas sujetos a altas deposiciones de nitrógeno (Renderos, 2001).

4.4.2.5 Significación ambiental de las pérdidas del nitrógeno

En resumen, el nitrógeno se pierde hacia el medio ambiente en forma de nitrato en las aguas de avenamiento y de escorrentía superficial, y hacia la atmósfera como nitrógeno elemental y óxidos nitrogenados, después de la nitrificación del amonio y como amoníaco volatilizado.

La lixiviación del nitrato y las pérdidas por escorrentía tienen importancia porque aumentan el contenido de nitrato de las aguas superficiales y subterráneas y, por consiguiente, el abastecimiento de agua (figura 3). Los altos niveles de nitrato en el agua potable pueden causar problemas médicos. La metahemoglobinemia (enfermedad azul de los bebés) en los lactantes está asociada con una absorción de nitrato, y existe la sugerencia no comprobada de la relación entre el nivel de absorción de nitrato y la formación en el cuerpo humano de nitrosaminas, posiblemente carcinógenas (FAO, 1986).

La pérdida de nitrógeno y de óxido nitrogenado hacia la atmósfera no tiene una significación ambiental determinada, aunque ha habido sugerencias sin confirmar que la emisión de grandes cantidades de óxidos nitrogenados podría afectar la capa de ozono estratosférica. En la actualidad no se considera que este efecto tenga alguna significación.

La volatilización del amoníaco no es un problema ambiental, puesto que el amoníaco se disipa en la atmósfera a una concentración sumamente baja.

Cuenca de alimentación alterada por la actividad humana

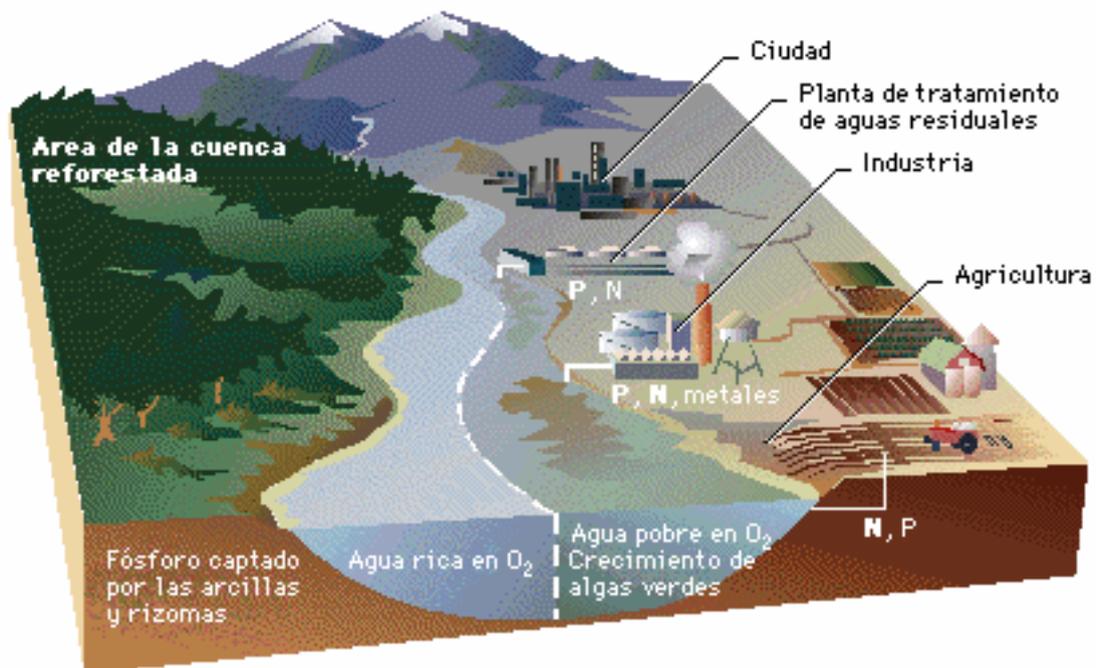


Figura 3. Eutrofización de las aguas.

Fuente: Enciclopedia Microsoft Encarta 2006.

4.5 Disponibilidad del nitrógeno con relación al pH

Uno de los caracteres fisiológicos notables de la solución del suelo es su reacción y de cómo los microorganismos y las plantas superiores están muy supeditadas a su ambiente químico; desde hace mucho tiempo se presta gran atención a la reacción del suelo; es decir, si es ácida, neutra o alcalina (Lyttleton y Buckman, 1952; Mela, 1963).

Algunas soluciones del suelo tienen un promedio mayor de iones hidrógenos sobre los hidroxilos y por tanto son ácidas. Otras, por el contrario, son alcalinas, y también hay soluciones que tienen una misma concentración de iones hidrógenos e hidroxilos y por tanto son neutras.

En cualquiera de esos casos la relación se mide en términos de concentración de iones hidrógenos, y se expresa logarítmicamente en valores de pH. De modo que la acidez del suelo (pH) es menor que 7. Contrariamente, la alcalinidad del suelo indica una concentración de iones hidroxilos en la solución, y tiene un pH mayor que 7.

La reacción del suelo tiene una gran influencia sobre la disponibilidad de los nutrientes vegetales, que suele ser más elevada entre pH 6.5 y 7.5 (figura 4).

Los iones H^+ parecen tener influencia considerable no solamente por la solubilidad, sino también sobre la facilidad con que los elementos nutritivos son absorbidos y utilizados por las plantas, aun cuando sean fácilmente solubles. Un buen ejemplo de esto es la influencia sobre la utilización del N amoniacal y de nitratos por las plantas. Con un pH mayor que 6, las sales de amonio son utilizadas con mayor facilidad, pero en suelos que son moderada o fuertemente ácidos, aparentemente se absorben con mayor facilidad los nitratos. La actividad biológica es también mayor en niveles intermedios de pH (alrededor de pH 7), de manera que se incrementa la descomposición de la materia orgánica del suelo y la liberación de nutrientes como el nitrógeno (FAO, 1986).

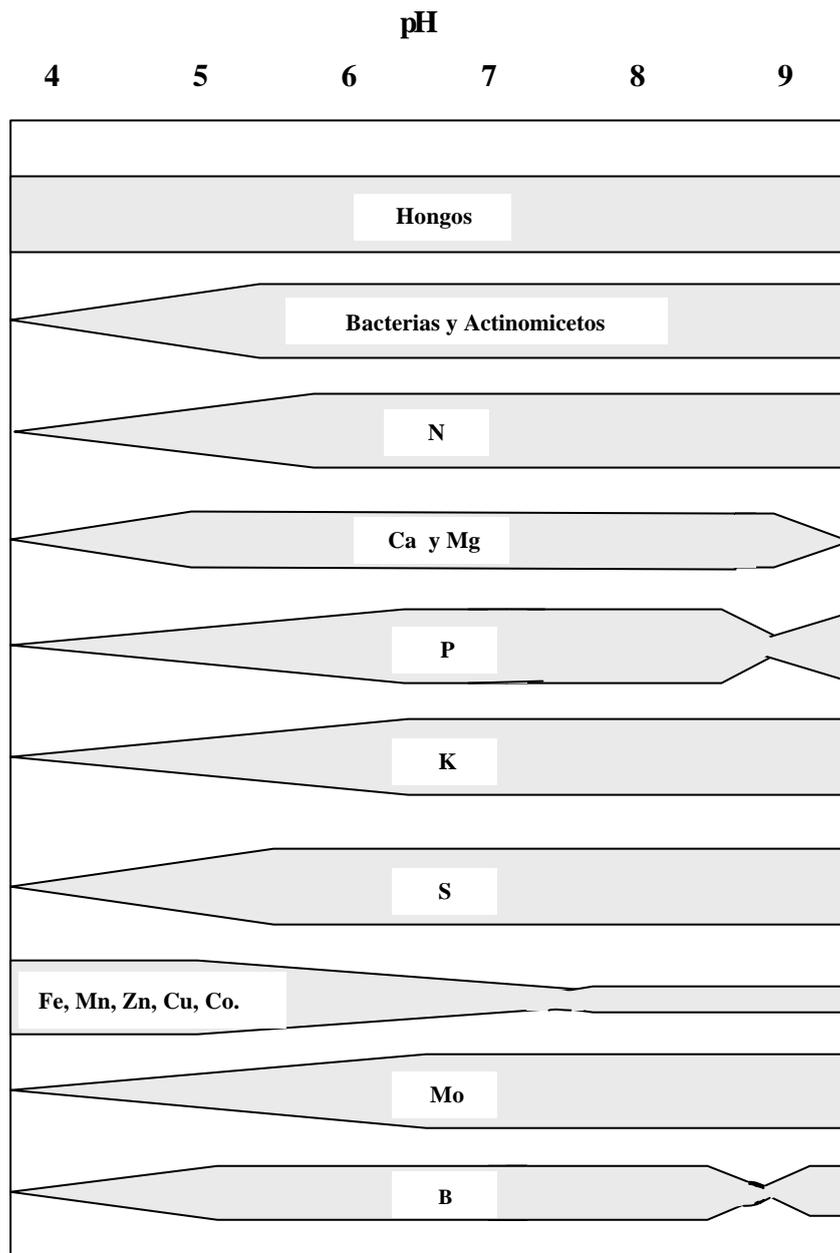


Figura 4. El pH del suelo, la disponibilidad relativa de nutrientes vegetales y la actividad de la microflora edáfica (mientras más ancha la banda, mayores son la disponibilidad y la actividad).
Fuente: FAO, 1986.

4.6 Influencia de la materia orgánica en la fertilidad del suelo

La influencia más evidente es el color. En la mayoría de los casos los distintos tonos de gris, pardo y negro se deben al humus. La granulación en condiciones favorables es una influencia interrelacionada y es claro, se la debe fomentar especialmente en los suelos turbosos, en los que son tan necesarios la aireación y el drenaje. En general, se obtiene una capacidad de laboreo satisfactoria solamente cuando el contenido de materia orgánica es mayor que un cierto valor. Además, al aumentar el contenido de humus el suelo adquirirá con seguridad un mayor poder de retención de agua y aumentará su capacidad total de intercambio. Probablemente, un tercio de la capacidad total de intercambio de un suelo mineral representativo sea debido a la materia orgánica.

Un aumento del contenido de materia orgánica no significa solamente un mayor porcentaje de nitrógeno total y de azufre, sino también una mayor actividad. Esta última tampoco se limita a los dos elementos mencionados; debe tenerse en cuenta también el desprendimiento de bióxido de carbono, además tiene importancia la proporción elevada de fósforo que contiene la materia orgánica.

Sin duda, la materia orgánica del suelo es un gran movilizador, y se tienen, luego, las acciones biológicas, no sólo con respecto al aporte, sino también en lo que se refiere a los elementos nutritivos. Estas interrelaciones bioquímicas son en realidad las que hacen del humus un constituyente indispensable de los suelos.

4.7 Aspectos generales ligados al cultivo del café

Taxonómicamente, el café está definido entre la familia de las rubiáceas, que posee cerca de 400 géneros y 5000 especies, principalmente árboles o arbustos. En el género *Coffea* existen mapas de especies, sin embargo sólo tres de ellas se cultivan comercialmente, en especial *Coffea arabica*. De entre las demás especies del género, su cultivo es el más importante en el mundo, consecuencia de los aspectos organolépticos de la bebida, de mayor calidad y homogeneidad.

El sistema radical está compuesto de un eje central cónico o raíz pivotante, que alcanza hasta 60 cm, de él salen dos tipos de raíces, unas profundas de sostén y otras que se extienden lateralmente, de las cuales brotan las raicillas que son las que absorben el agua y los nutrientes del suelo, por lo que es importante protegerlas de las plagas y las enfermedades. En condiciones de humedad, el 80 – 90% de ellas se concentra en los primeros 30 cm y cubre un radio, a partir del tronco, de hasta 2.5 m (ICAFE, 1995; Malavolta, 1981).

4.7.1 El café y el nitrógeno: manejo eficiente de la fertilización nitrogenada

Este elemento es uno de los más limitantes de la producción cafetalera (Urquiaga y Zapata, 2000; Carvajal, 1984; FAO, 1986). La mineralización del nitrógeno orgánico no es suficiente para satisfacer los requerimientos de los cafetales de mediana o alta producción, por lo que sus necesidades deben ser complementadas con aplicaciones de fertilizantes químicos u orgánicos.

Los estudios sobre la dinámica del N del suelo en el sistema suelo/planta se intensifican debido a los altos precios del mismo, tratándose principalmente de determinar los factores más relacionados con la recuperación de éste por las plantas.

La eficiencia de la fertilización nitrogenada en muchos sistemas de cultivos, afirman Reynolds-Vargas *et al.* (1994), es relativamente baja, y los fertilizantes nitrogenados no utilizados por el cultivo o los microorganismos del suelo podrán lixiviarse (NO_3^-) hacia las aguas subterráneas.

Urquiaga y Zapata (2000), hacen la observación que para mantener a niveles altos la productividad del cafeto, el N es aplicado, en general, en América Latina en cantidad promedio de 100 a 200 kg N ha⁻¹ año⁻¹.

Un manejo eficiente de la fertilización nitrogenada en el cultivo del café consiste, básicamente, en una adecuada selección del tipo de fertilizante, oportuna localización y la aplicación fraccionada de éste, según estipulan Urquiaga y Zapata (2000).

Respecto al fraccionamiento de la aplicación del fertilizante nitrogenado, Carvajal (1984) propone que dos o tres fragmentaciones del fertilizante de alrededor de 90 kg ha⁻¹ cada una son recomendadas para maximizar los rendimientos del café.

Por otro lado, la eficiencia con la que el fertilizante es utilizado por el café es aparentemente baja. Sommer (1978), estimó que alrededor del 30% del N aplicado como fertilizante fue absorbido por las raíces del café.

4.7.1.1 Épocas de fertilización, fraccionamiento y cantidad del fertilizante.

El período de fertilización está determinado en gran medida por la precipitación de cada zona; esto se debe a que la lluvia ejerce una fuerte influencia sobre la fenología de los cafetos, además de ser necesaria para mantener húmedos los suelos cafetaleros permitiendo un crecimiento activo de las plantas, así como la adecuada solubilización de los elementos nutritivos contenidos en los insumos fertilizantes.

También se recomienda el fraccionamiento de la aplicación del fertilizante en tres épocas, esto con el fin de aminorar las pérdidas por lixiviación, escorrentía y volatilización. Los períodos de fertilización varían según la región, en lugares que presentan un período seco extenso y bien definido (diciembre-abril) se recomienda hacer la primera fertilización a base de fórmula completa con el establecimiento de las lluvias (mayo-junio), la segunda, con la misma fórmula y dosis, dos meses después (julio-agosto) y la tercera con un compuesto puramente nitrogenado, antes de la finalización del período lluvioso (octubre-noviembre) (ICAFE, 1995).

4.7.2 Aspectos generales ligados al uso de árboles de sombra en el café

En la literatura existe una larga discusión sobre las funciones de la sombra en el cultivo del café. Sin embargo, se han hecho pocos esfuerzos para organizar los diferentes factores que un caficultor tiene que tomar en cuenta para escoger entre los dos sistemas de cultivos. Según Muschler (2000), los factores principales se pueden organizar en tres grupos (figura 5).

1. Objetivos del productor.
2. Factores ambientales del cultivo.
3. Insumos al alcance del caficultor para mejorar los factores ambientales.

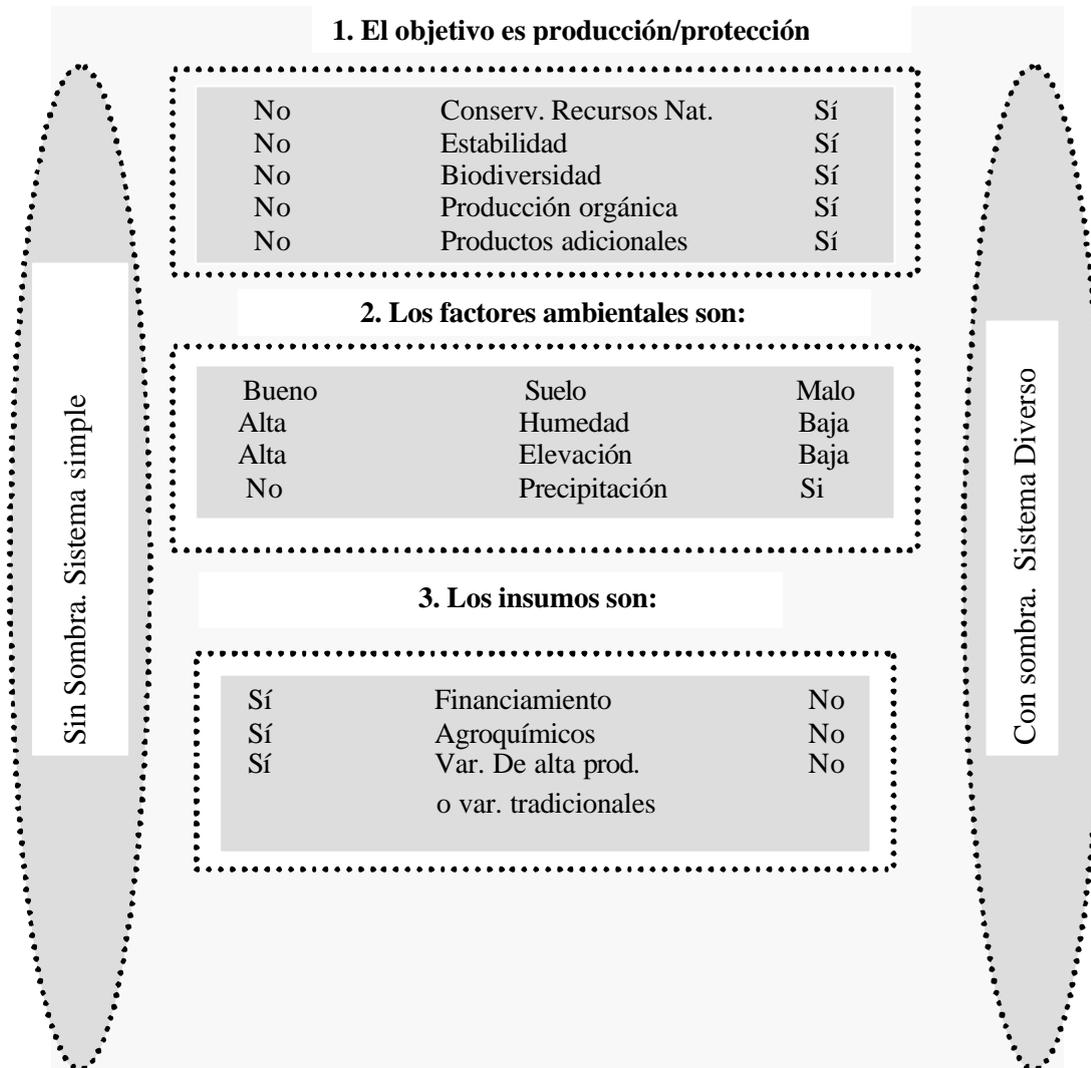


Figura 5. Los tres grupos de factores principales que determinan la decisión de si se cultiva café con o sin sombra. La combinación de factores determina la densidad y diversidad de los árboles asociados.

Fuente: Muschler, 2000.

Estos tres grupos representan, en el mismo orden:

- a. Los factores de preferencias personales que varían con el productor y posiblemente con el tiempo.
- b. Los factores que no se pueden cambiar simplemente (por ejemplo, suelos pedregosos).

- c. Algunas herramientas para ajustar o modificar los factores ambientales dentro de ciertos límites.

En cafetales con árboles, las copas de los árboles reducen la radiación y la temperatura (Barradas y Fanjul, 1986). Al mismo tiempo, se aumenta la humedad del aire y se crea un microclima diferente cerca del árbol, lo cual puede ser beneficioso en tiempos de sequía. Los árboles pueden también causar efectos indirectos positivos y negativos a los cafetos a través de plagas y enfermedades. La incidencia de malezas puede ser manejada a través de la sombra y la hojarasca de los árboles asociados. La sombra reduce el crecimiento de las malezas, particularmente de gramíneas, y la hojarasca forma una barrera física encima del suelo que dificulta la germinación de semillas de malezas (Muschler, 2000). Según Beer (1988), los árboles de sombra contribuyen con 5-10 toneladas de material orgánico $\text{ha}^{-1} \text{año}^{-1}$.

Parte de las contradicciones de los estudios sobre efectos de sombra pueden ser explicadas por las condiciones ambientales y ecológicas en las que se realizaron. Los efectos más importantes que interfieren con el efecto de sombra sobre la producción de café son probablemente las condiciones del suelo y la elevación sobre el nivel del mar, la cual determina, en gran parte, el patrón climático (Willey, 1975). Para poder comparar los resultados de los diferentes trabajos sobre el efecto de la sombra, es necesario desagregarlos en función de estos factores ambientales.

Para suelos buenos, generalmente profundos y con altos niveles de nutrimentos, parece que existe una elevación óptima para el café, donde produce más sin sombra, dado que, en cierta medida, no hay limitaciones ambientales. Hacia alturas menores, las temperaturas suben y así el estrés ambiental para los cafetos. En estas condiciones, el café tiende a producir más, bajo sombra intermedia. La sombra ayuda a reducir el estrés ambiental provocado en este caso por los fuertes vientos y las altas temperaturas.

De entre las diferentes especies utilizadas para la regulación de la sombra en el cultivo del café se encuentra el Madero Negro [*Gliricidia sepium* (Jacquin) Kunth ex Walpers]. Según Otárola (1995), es una planta leñosa de uso múltiple, de madera muy resistente, cuyas flores

son consumidas por el hombre y su forraje por los rumiantes, ya que contienen altos contenidos de proteínas (20-27%) y la digestibilidad de la materia seca es de 58%.

Convive con una diversidad de condiciones imperantes en el sitio, con diversidad de cultivos, pastos y en diversas formas de uso del suelo. Presenta una alta capacidad de rebrote y buena resistencia al fuego. La leña de Madero Negro tiene un alto poder calórico (leña $4,550 \text{ kcal kg}^{-1}$ y en carbón $7,150 \text{ kcal kg}^{-1}$) lo que la hace ser preferida.

Es una especie de muy rápido crecimiento (aún en zona semiárida) y rápido desarrollo de la superficie foliar, alcanzando la proyección de copa en un año (una superficie de 6 m^2). El crecimiento en altura muestra un incremento medio anual de 0.7 a 3.3 m. La velocidad de descomposición foliar es alta; su hoja se descompone muy rápido en el suelo y no se ve una acumulación de hojarasca bajo el árbol.

Es buena productora de abono verde (mantillo). Posee una capacidad para formar follaje fácilmente (abundante masa foliar). Se reportan producciones de $11.9 \text{ ton ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ de follaje seco con un promedio de 6.6 ton en 5 años. La producción de forraje varía de 2 a 20 ton ha^{-1} . En cuanto a su efecto restaurador en el ciclaje de nutrientes, ha demostrado una adecuada capacidad de fijación de nitrógeno atmosférico de $13 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ (Repertorium Botanices Systematicae, 2006).

La poda es una de las prácticas más importantes para obtener un buen aprovechamiento del Madero Negro. Mediante la poda de formación, se podrá reducir el peso de la biomasa en la parte apical de las estaciones no muy estables. Esta poda tiene como fin fortalecer el árbol y eventualmente aumentar la producción de biomasa, por eso se recomienda efectuarla al inicio de la estación seca, cuando el árbol ha perdido casi la totalidad de las hojas y su actividad fotosintética se encuentra restringida al mínimo.

Melchor *et al.* (2005), en un estudio que se propuso evaluar la concentración total de nitrógeno en la biomasa aérea de Madero Negro y otras leguminosas reporta que éste oscila entre 3.19 a 2.64% al reducirse la frecuencia de podas de 4 a 24 semanas; asimismo señala que

el nitrógeno total acumulado fue superior en el régimen de 24 semanas incorporando hasta 272 kg ha^{-1} que en otras frecuencias de poda debido a la mayor producción de biomasa.

Baggio (1982), al analizar las hojas maduras, jóvenes y tallo tierno, reporta que el porcentaje de N en la materia seca de Madero Negro es de 3.99, 4.57 y 2.12, respectivamente; además, incorpora 60 toneladas de biomasa por hectárea anualmente con densidades de siembra de 10, 000 plantas por hectárea, y 125 toneladas para densidades de siembra de 40,000 plantas por hectárea. Pezo e Ibrahim (1998), señalan que el contenido de proteína cruda es de 24.8%, y el contenido de nitrógeno de 3.97%.

En lo que respecta al comportamiento del nitrógeno del suelo, sobretodo en los horizontes superficiales, Varnero (1980), refiere que éste se encuentra esencialmente en forma orgánica (95 % del N total). La fracción mineral representa un pequeño porcentaje del N total (1-5 %). El contenido N-NO_3^- del suelo es típicamente mayor durante la época seca y menor durante la época húmeda. Dependiendo de la plantación, los contenidos de nitrato en la capa superficial 0-20 cm alcanzan promedios de dos hasta cuatro veces más en la época seca que en la época húmeda. La cantidad de nitrato que está más profunda en el perfil del suelo (>40 cm) también parece diferir entre ambas épocas, pero no con tanta intensidad como sucede en la capa superficial (Reynolds-Vargas *et al.*, 1994).

Desde el punto de vista agronómico, los estudios del proceso de mineralización del nitrógeno orgánico tienen varios puntos de importancia. Por un lado, conocer la mineralización neta del N orgánico a lo largo del período de crecimiento de un cultivo, significa conocer la posibilidad de reposición del N en la solución del suelo a partir de la materia orgánica existente en él, así como la disponibilidad del nutriente para las plantas que estará en relación a este proceso (y también a la inmovilización del nutriente por la biomasa microbiana del suelo que compite por el N mineral).

Es por ello que es de gran interés conocer los factores que regulan la producción y equilibrio entre las formas orgánicas y las formas minerales del nitrógeno en un sistema agroforestal, en donde la disponibilidad de dicho nutrimento para el cultivo agrícola y su restitución al ciclaje de nutrientes resulta de elemental importancia para el vital desarrollo de dicho cultivo. Estos

sistemas podrían estar sujetos a procesos de inmovilización de N, lo cual podría estar afectando la productividad del mismo. Por tanto, en el presente trabajo investigativo se pretende evaluar la producción neta de nitrógeno mineral en un sistema agroforestal con café.

V. MATERIALES Y MÉTODOS

5.1 Ubicación del sitio de estudio

El estudio de mineralización y disponibilidad de nitrógeno para la planta de café, se realizó en suelos provenientes de la finca “San Francisco”, localizada en el km. 39 ½ de la carretera a San Marcos-Las Esquinas, en el departamento de Carazo, zona sudoeste de Nicaragua, y cuya ubicación geográfica responde a las coordenadas 11° 53' 80" latitud Norte y 86° 14' 05" longitud Oeste (figura 6), a una altitud de 670 msnm, con una precipitación acumulada anual de 1400 mm, con temperatura promedio anual de 25°C y una humedad relativa de 80%.

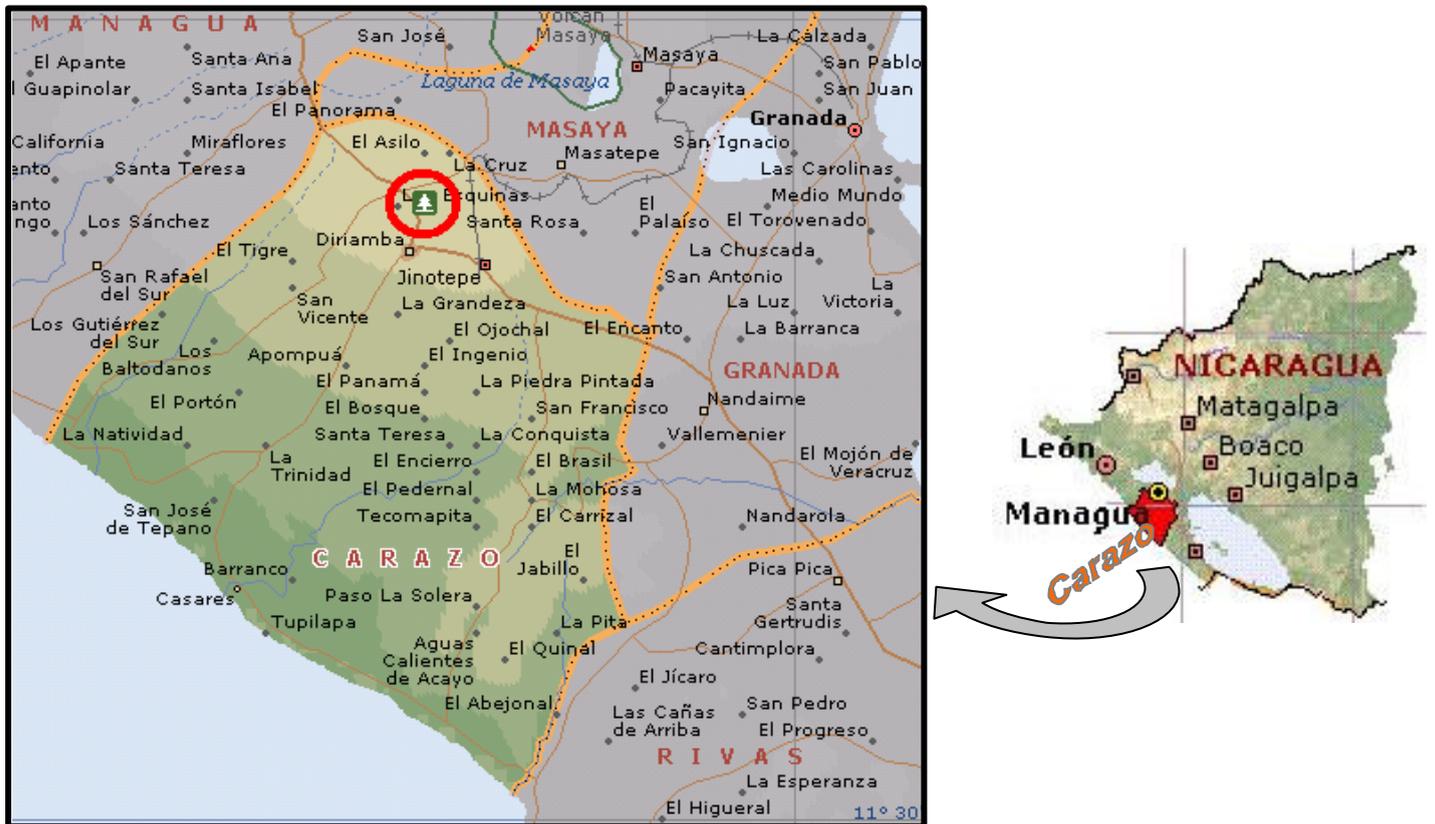


Figura 6. Ubicación geográfica de la finca San Francisco, Departamento de Carazo, Nicaragua.

5.2 Caracterización de l suelo

Los suelos de la zona pertenecen a la serie San Marcos, del orden de los Andisoles con topografía plana, pH de 4.8-6.3 y textura franco arenosa, las arcillas alófanas le confieren a estos suelos sus cargas positivas, lo que los hace capaces de adsorber aniones como los NO_3^- .

En muestras de suelo tomadas en septiembre del 2002 se determinó que el suelo presenta textura franco arenosa, pH entre 5.4 y 5.7, alto contenido de materia orgánica y nitrógeno, pero bajo en fósforo (Tablas 1 y 2).

Tabla 1. Características físicas del suelo en la Finca San Francisco, Carazo.

TRATAMIENTOS	Arcilla (%)	Limo (%)	Arena (%)	CLASE TEXTURAL
Sombra y Fertilizante (SF)	2.5	25	72.5	Franco Arenoso
Pleno sol y fertilizante (PSF)	5	22.5	72.5	Franco Arenoso
Sombra sin fertilizante (SSF)	5	22.5	72.5	Franco Arenoso

Fuente: Laboratorio de Suelo y Aguas, UNA 2002.

Tabla 2. Características químicas del suelo en la finca San Francisco, Carazo.

TRATAMIENTOS	pH en KCl	MO (%)	N (%)	P ppm	K	Ca	Mg	Fe	Cu	Zn	Mn
					meq / 100 g de suelo			ppm			
SF	5.7	12.5	0.62	7.47	0.48	9.81	1.72	178	94	70	111
PSF	5.6	11.7	0.58	4.94	0.56	10.11	2.04	184	111	81	139
SSF	5.4	11.2	0.56	0.12	0.37	7.23	1.03	211	118	68	121

Fuente: Laboratorio de Suelo y Aguas, UNA 2002.

5.3 Características de los sistemas de manejo bajo estudio

La plantación de café (*Coffea arabica* L.) vr. Costa Rica 95 fue establecida en el año 2000 (anexos 1 y 2). En Mayo del 2002, fueron delimitadas tres parcelas grandes, café con sombra y fertilizante (SF), café a pleno sol y fertilizante (PSF) y café con sombra sin fertilizante (SSF), cada una de 40 metros de ancho por 48 metros de largo (1,920 m²), con 24 hileras distanciadas cada dos metros, con una longitud de un metro entre planta y planta para una densidad poblacional de 5,000 plantas de café por hectárea; con árboles de sombra de Madero Negro, especie arbórea típica para sombra en los sistemas de producción de café en la región del Pacífico de Nicaragua, distribuidos uniformemente en el área (8 x 10 m). El área total del experimento fue de 5,760 m² (figura 7).

Para establecer la parcela a pleno sol se procedió a eliminar los árboles de Madero Negro y los residuos de éstos fueron retirados de la parcela para evitar el efecto de la incorporación de ramas y hojas sobre la fertilidad del suelo.

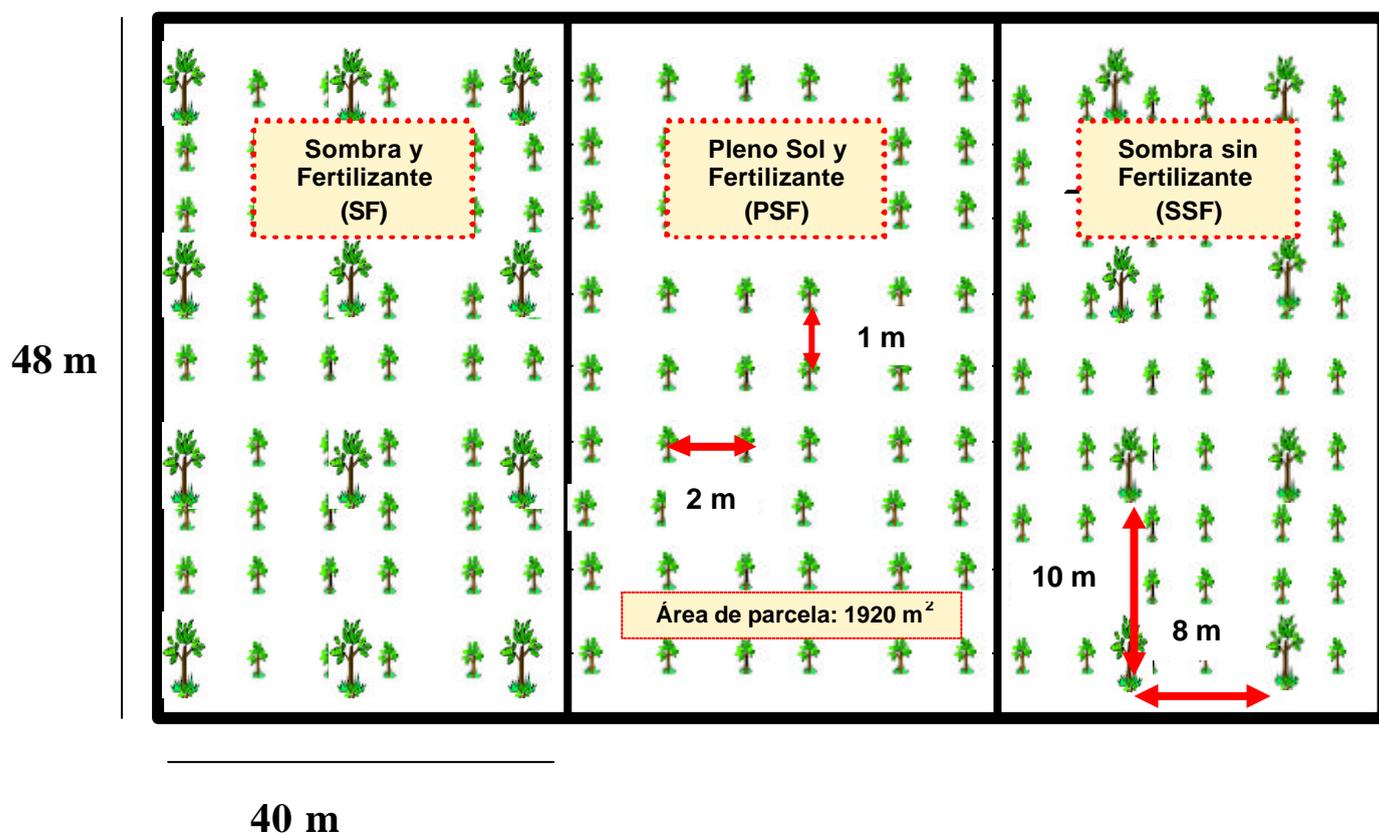


Figura 7. Descripción de los tratamientos.

El manejo agronómico de las parcelas se realizó de acuerdo al manejo convencional planificado por la finca donde se estableció el estudio. El área sembrada en esta finca es de 172.25 ha (245 mz), con una producción promedio de 188.4 kg oro/ ha (4 qq oro/ mz); debido a la joven edad de la plantación, se registró tal rendimiento.

El manejo convencional del cultivo incluyó el manejo de malezas a través del control manual con machete realizándose cuatro pases de deshierba, también se realizó un desbejuque manual (6 de septiembre del 2002); el control químico de las malas hierbas se presenta en la tabla 3.

Tabla 3. Momento de aplicación, productos químicos y dosis de herbicidas utilizados en el experimento.

Momento de Aplicación							
Junio-2002		Agosto-2002		Octubre-2002		Junio-2003	
Producto	Dosis	Producto	Dosis	Producto	Dosis	Producto	Dosis
Glifosato	2.0 l/ha	Glifosato	2.0 l/ha	Paraquat	2.0 l/ha	Glifosato	2.0 l/ha
2-4D	0.7 l/ha	2-4D	0.7 l/ha			2-4D	0.7 l/ha

Fuente: Finca San Francisco.

Las plagas y enfermedades fueron manejadas utilizando productos químicos que se describen en la tabla 4.

La fertilización edáfica sólo se aplicó a dos parcelas de las tres que se seleccionaron para dicho estudio, el método de aplicación del fertilizante fue al voleo sobre la base de la planta. Los productos y dosis se presentan en la tabla 5.

Tabla 4. Momento, productos y dosis de agroquímicos aplicados a los sistemas de manejo.

Momento de Aplicación									
Junio/02		Agosto/02		Octubre/02		Marzo/03		Mayo/03	
Producto	Dosis	Producto	Dosis	Producto	Dosis	Producto	Dosis	Producto	Dosis
Cobre	2.5 kg/ha	Cobre Nordox	2.5 kg/ha	Cobre Nordox	2.5 kg/ha	Urea	3.8 kg/ha	Urea	3.8 kg/ha
Urea	3.8 kg/ha					MOP	2.5 kg/ha	Sulfato de Zinc	1.0 kg/ha
Endosulfan	1.4 l/ha	Caporal	455 cc/ha	Alto	355 cc/ha	Ácido Bórico	1.0 kg/ha	Ácido Bórico	1.0 kg/ha
Adherente	150 cc/barril					Lorsban	1.4 l/ha	Cobre	2.5 kg/ha
Agua	2 barriles/ha	Urea	5.0 kg/ha						

MOP: Muriato de potasio.

Fuente: Finca San Francisco.

Tabla 5. Momento, fórmulas y dosis de fertilizantes aplicados a las dos parcelas sometidas a fertilizaciones.

Momento de Aplicación							
Mayo-2002		Agosto-2002		Octubre-2002		Mayo-2003	
Fórmula	Dosis	Fórmula	Dosis	Fórmula	Dosis	Fórmula	Dosis
Urea 46% N	194.00 kg/ha	15-15-20	323.50 kg/ha	30-00-20	194.00 kg/ha	30-00-20	259.00 kg/ha
MOP	64.69 kg/ha						

MOP: Muriato de potasio.

Fuente: Finca San Francisco.

Los productos químicos y las dosis aplicados al cultivo de café en los calendarios de la tablas 4 y 5 son los mismos que fueron aplicados para el ciclo 2003-2004.

5.4 Muestreo del suelo

Para obtener las muestras de suelo dentro de cada parcela de estudio y determinar el N disponible en el suelo de la finca durante la estación seca del año 2003-2004 (diciembre-mayo), se seleccionaron cuatro árboles aleatoriamente en la parte central de cada área de muestreo y se tomaron las muestras con ayuda del barreno en las hileras (entre dos cafetos) y en la calle (entre las hileras de café), a 0-10 cm y 10-20 cm de la capa superficial del suelo. En las parcelas con sombra se tomaron las muestras a dos metros del árbol y en la parcela sin sombra a cuatro metros del tronco del árbol podado. Por cada tratamiento se obtuvo 16 muestras compuestas de un kilogramo de suelo (tabla 6). En el campo fueron separados restos vegetales y piedras y depositadas las muestras en bolsas plásticas debidamente etiquetadas. Luego fueron trasladados el mismo día al Laboratorio de Suelos y Aguas de la UNA.

Tabla 6. Muestreo para determinación de disponibilidad de nitrógeno

Tratamientos	Punto de muestreo	Profundidad (cm)	Repeticiones	Total muestras/trat.
SF	Hilera	0-10 y 10-20	4	16
	Entre hileras	0-10 y 10-20	4	
PSF	Hilera	0-10 y 10-20	4	16
	Entre hileras	0-10 y 10-20	4	
SSF	Hilera	0-10 y 10-20	4	16
	Entre hileras	0-10 y 10-20	4	
Total				48

5.5 Montaje del experimento y preparación de las muestras

5.5.1 Estimación de la mineralización neta del nitrógeno del suelo

Para el estudio se utilizó el método propuesto por Anderson e Ingram (1993), quienes indican que bajo condiciones *in vitro* el proceso de mineralización de nitrógeno se puede realizar bajo incubación en el laboratorio, el cual es un método alternativo que puede utilizarse para cuantificar la mineralización y nitrificación neta.

El procedimiento de incubación aeróbica se aplicó a la capa de suelo de 0-20 cm. Este método utiliza una muestra compuesta de suelo, con un mínimo de 10 muestras ha^{-1} , donde es recomendable que las muestras sean incubadas por separado. La temperatura de incubación fue de $30\text{ }^{\circ}\text{C}^2$; el peso de la muestra se revisó periódicamente, y se realizó la corrección por pérdidas de agua.

De cada muestra compuesta de suelo se extrajo 50 gramos y fueron replicadas cuatro veces; luego fueron puestas en contenedores plásticos después de haber sido pasado por un tamiz, seguidamente los suelos fueron incubados a la humedad de campo a temperatura ambiente ($30\text{ }^{\circ}\text{C}$) y a media luz; los contenedores fueron cubiertos y revisados semanalmente para mantener la humedad de campo debido a las pérdidas de agua.

5.5.1.1 Procedimiento en laboratorio para la extracción del nitrógeno mineral

Para la extracción del nitrato y del amonio, se procedió de acuerdo al procedimiento de Mulvaney (1996):

- a.** De cada muestra de suelo y con la ayuda de una balanza analítica, se pesó 10 gramos de suelo de cada repetición.
- b.** A cada muestra de 10 gramos de suelo se agregó 25 ml del reactivo cloruro de potasio (K Cl) 1 M, mediante el uso de un dispensador previamente calibrado, basado en la relación 1 g suelo : 2.5 ml K Cl, constituyendo la solución extractora del N mineral. Inmediatamente, se taparon las botellas para evitar cualquier fuga.
- c.** Se agitaron las muestras de suelo por 30 minutos, mediante el uso de un agitador mecánico horizontal.
- d.** Finalmente, se procedió a filtrar las muestras utilizando papel filtro Whattman #42 y se guardaron los extractos claros en tubos de vidrios al vacío Vacutainer y se identificaron mediante su debida etiquetación.

² La diferencia entre la temperatura promedio anual del sitio de estudio y la establecida por el método de incubación aeróbica es de $5\text{ }^{\circ}\text{C}$; sin embargo, para la conducción de las muestras en laboratorio se mantuvo la temperatura de incubación a $30\text{ }^{\circ}\text{C}$, siguiendo de manera estricta el método propuesto por Anderson e Ingram (1993).

5.5.2 Procedimiento para determinación colorimétrica del N mineral

Para determinar el N mineral a partir de los extractos filtrados se utilizó el método colorimétrico (Mulvaney, 1996), haciendo uso del equipo autoanalizador marca ALLIANCE Integral Futura.

Los materiales utilizados para la determinación fueron:

1. Tubos para el automuestreador.
2. Manifold para Amonio.
3. Reservorios para reactivos.

5.5.2.1 Determinación colorimétrica del nitrato

Preparación de reactivos:

a. Solución de Cloruro de Amonio: se disuelve en un balón aforado de un litro 10 gramos de la sal cloruro de amonio (NH_4Cl) y se afora con agua destilada. Este reactivo es estable por 2 semanas. Luego, se adiciona una gota de Brij35 al reservorio del equipo que contiene esta solución.

b. Sulfanilamida: se disuelve en aproximadamente 250 ml de agua destilada 25 ml de HCl concentrado (12N), luego adiciona 2.50 gramos del reactivo Sulfanilamida ($\text{NH}_2\text{C}_6\text{H}_4\text{SO}_2\text{NH}_2$), se disuelve y afora a 500 ml con agua destilada. Se guarda en botella oscura. Este reactivo es estable por dos semanas.

c. N-Naftyletilendiamina: en un balón de 500ml, se coloca 0.250 gramos del reactivo N-Naftyletilendiamina ($\text{C}_{10}\text{H}_7\text{-NH-CH}_2\text{-CH}_2\text{-NH}_2 \cdot 2\text{HCl}$), se disuelve y afora a 500 ml con agua destilada.

Se guarda en botella oscura. Este reactivo es estable por dos semanas.

d. Solución estándar de 100 mg/l de N-NO₃⁻: se pesa 0.722 gramos de reactivo Nitrato de Potasio (NO₃K) puro y seco, luego se disuelve y afora a un litro con agua destilada.

e. Solución estándar de 100 mg/l de N-NO₂⁻: se pesa 0.4928 gramos de reactivo Nitrito de Sodio puro y seco, luego se disuelve y afora a un litro con agua destilada.

f. Curva Patrón se la solución estándar de 100 mg/l de N-NO₃⁻, se prepara una curva patrón de 0.25 a 2.5 ppm de N-NO₃⁻, en solución de KCl 2N.

g. Reactivo BRIJ 35.

h. Columna de Cadmio: referencia ALLIANCE CADM.001

5.5.2.1.1 Procedimiento para determinar nitrato

a. Se realizan todas las conexiones de los reactivos según el Manifold a utilizar, sin la columna de Cadmio. La solución de "Rinse" es KCl 2N.

b. Se pasa el reactivo de cloruro de amonio el tiempo suficiente hasta verificar que no hay, en el circuito de la columna, ni aire ni agua. Luego, se conecta la columna de cadmio.

c. Cuando todo el Manifold está conectado correctamente, se pasa primero por cinco minutos una solución patrón de 100 ppm de N-NH₂⁻. Luego, se espera un minuto y se pasa por cinco minutos la solución patrón 100 mg/l de N-NH₃⁻. Si la columna de cadmio funciona correctamente la diferencia en el valor de densidad óptica (DO) no debe ser superior al 10%.

d. Cuando el sistema está funcionando correctamente, se colocan las muestras en el automuestreador y se sigue todo el proceso indicado para la determinación de nitratos, según el Manifold y modelo del equipo.

f. Al finalizar el análisis se debe pasar por la columna de cadmio únicamente cloruro de amonio para lavarla bien, en este caso la solución "Rinse" se cambia también por cloruro de amonio y se deja al menos por 15 minutos. Posteriormente, se desconecta la columna de cadmio y se guarda en solución de cloruro de amonio.

g. Una vez que se quita la columna de cadmio se desconectan los reactivos y se lava todo el sistema por 30 minutos con agua destilada.

5.5.2.2 Determinación colorimétrica del amonio

Preparación de reactivos:

a. Solución Tampón se disuelve en aproximadamente 700 ml de agua destilada 25 gramos de hidróxido de sodio (NaOH) en escamas, se adiciona 10 gramos de E.D.T.A. sal disódica y 10 gramos de tartrato de sodio y potasio ($\text{KNaC}_4\text{H}_4\text{O}_6 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$), se disuelve y afora a un litro con agua destilada. Luego, se adicionan dos gotas de Brij35 al reservorio del equipo que contiene la solución tampón.

b. Salicilato de Sodio: se disuelve en aproximadamente 700 ml de agua destilada 42.5 gramos de salicilato de sodio ($\text{OHC}_6\text{H}_4\text{COONa}$) y 0.30 gramos de nitroprusiato de sodio ($\text{Na}_2\text{Fe}(\text{CN})_5\text{NO} \cdot 2\text{H}_2\text{O}$). Se afora a un litro con agua destilada. Luego, se guarda en botella oscura. Este reactivo es estable por un mes.

c. Dicloroisocianurato de Sodio: se disuelve 0.625 gramos del reactivo dicloroisocianurato de sodio ($\text{C}_3\text{Cl}_2\text{N}_3\text{O}_3\text{Na}$) y tres gramos de hidróxido de sodio en 0.50 litro de agua destilada. Se guarda en botella oscura. Este reactivo es estable por un mes.

d. Reactivo BRIJ 35.

e. Solución estándar de 100 mg/l de N-NH_4^+ : se disuelve 0.4716 gramos de $(\text{N-NH}_4^+)_2\text{SO}_4$ en un balón aforado de un litro con agua destilada. La solución patrón contendrá 100 mg/l de N-NH_4^+ .

f. Curva Patrón: de la solución estándar de 100 mg/l de N-NH_4^+ , se prepara una curva patrón de 0.25 a 2.5 ppm de N-NH_4^+ , en solución de K Cl 2 N.

5.5.2.2.1 Procedimiento para determinar amonio

a. Se realizan todas las conexiones de los reactivos según el Manifold a utilizar. La solución de "Rinse" utilizada fue K Cl 2N.

b. Las muestras se colocaron en el automuestreador y se siguió todo el proceso indicado para el Manifold y modelo del equipo.

c. Al finalizar el análisis se desconectaron los reactivos y se lavó todo el sistema por 30 minutos con agua destilada. Una vez que se analizaron las muestras se procedió al cálculo de las concentraciones de N-NH_4^+ y N-NO_3^- a través de las siguientes ecuaciones:

$$\text{N-NO}_3^- \text{ (mg/kg)} = (\text{ppmm} - \text{ppmbl}) * 100 / (\text{peso muestra corregida base seca})$$

Donde: ppmm : partes por millón de la muestra (mg/l de N-NO_3^-).

ppmbl : partes por millón del blanco (mg/l de N-NO_3^-).

$$\text{N-NH}_4^+ \text{ (mg/kg)} = (\text{ppmm} - \text{ppmbl}) * 100 / (\text{peso muestra corregida base seca})$$

Donde: ppmm : partes por millón de la muestra (mg/l de N-NH_4^+)

ppmbl : partes por millón del blanco (mg/l de N-NH_4^+).

Estos análisis para la determinación del N mineral a partir de los extractos claros se realizaron en el Laboratorio de Análisis de Suelos, Tejido Vegetal y Aguas del Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE), ubicado en Turrialba, Costa Rica.

5.6 Variables observadas

a. Mineralización neta: se estimó el contenido de N mineral a los 30 días de incubación de las muestras, a dos profundidades de muestreo (0-10 y 10-20 cm) del perfil del suelo. Además, se evaluó la evolución del N mineralizado en cada tiempo de incubación en dos sitios de muestreo (Calle e Hiler) y en tres sistemas de cultivo del cafeto. La mineralización neta se calculó por diferencias de los contenidos de nitrógeno mineral final (incubado) menos inicial, cuyo reporte estuvo expresado en mg N min / kg suelo / 30 días.

b. Fracciones del N mineral: se estimó el contenido neto de N-NH_4^+ y N-NO_3^- mineralizados a los 30 días de incubación, a dos profundidades (0-10 y 10-20 cm) en el perfil del suelo, en ambos sitios de muestreo y en tres sistemas de cultivo del cafeto.

5.7 Análisis de los datos

La estructuración de la base de datos para las variables observadas de la dinámica de mineralización se hizo mediante el uso de la hoja electrónica MICROSOFT EXCEL 2003. El procedimiento para la obtención de promedios de los datos provenientes de laboratorio de los niveles de N mineral se realizaron con el programa estadístico SAS (Statistical Analysis System) V.8, 2002.

VI. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

6.1 Biomasa incorporada al sistema producto de la poda³

Castro y Díaz (2004), reportan que como parte del manejo dado al sistema para la extracción de datos de incorporación de biomasa al mismo, se efectuó una poda el 23 de Septiembre del 2002 a los árboles de sombra de Madero Negro, consistente en un manejo de elevación y descentralización de la misma, propio de la zona en donde se realizó el experimento en los tratamientos manejados con sombra.

La incorporación de biomasa del Madero Negro reportada por Castro y Díaz (2004) en el tratamiento con fertilizante (SF) fue de 3,250 kg ha⁻¹ por las ramas y en las hojas 616.67 kg ha⁻¹; en el sistema sin fertilizante (SSF), fue de 2,389.58 kg ha⁻¹ a través de las ramas y en las hojas de 629.69 kg ha⁻¹.

En el sistema con fertilizante, el aporte de nitrógeno producto de la poda fue de 44.36 kg N ha⁻¹ en las ramas y 21.56 kg N ha⁻¹ en las hojas; en el tratamiento sin fertilizante fue de 24.76 kg N ha⁻¹ en las ramas y 23.42 kg N ha⁻¹ en las hojas.

En el caso del café, la época de mayor caída de hojarasca de los árboles de sombra, precede a la floración y fructificación del cultivo. Esta sincronización es importante cuando no se fertiliza artificialmente, debido a que le permite la liberación de nutrientes cerca de las raíces del café, justamente en el momento de máxima demanda de nutrientes. Además, en el caso del *Coffea arabica* la transferencia de nutrientes por la hojarasca y la rápida descomposición compensa ampliamente la exportación por cosecha, constituyendo así un fertilizante natural (Herrera *et al.*, 1985).

Generalmente, se acepta que existe una relación directa entre fertilidad del suelo y cantidad de materia orgánica que se deposita por un período largo de tiempo. De numerosos estudios se ha

³ Los resultados expuestos de biomasa incorporada al sistema producto de la poda son extraídos del trabajo realizado por Castro y Díaz (2004), que fue realizado en el mismo lugar de estudio y en los mismos sistemas aquí evaluados, como complemento de la presente investigación, ya que ambos proyectos forman parte de un mismo programa investigativo.

podido concluir que la cantidad de materia orgánica producida durante un año, es hasta tres o cuatro veces mayor en un cafetal sombreado que en uno sin sombra. También se ha observado que la cantidad de nutrimentos que se depositan en el suelo es mayor en los cafetales sombreados (Glover y Beer, 1984).

La existencia de “mulch”, producto de la caída de las hojas y residuos de la poda, ayuda a mantener la humedad del suelo en la época seca e incrementa la cantidad de materia orgánica del suelo. Así, los árboles de sombra contribuyen con 5-10 toneladas de material orgánico/ha/año (Beer, 1988).

6.2 Mineralización neta del nitrógeno orgánico

La mineralización de nitrógeno es el proceso biológico en el que el nitrógeno orgánico pasa a la forma inorgánica NH_4^+ (Mardóñez, 2000), y ocurre a medida que los microorganismos del suelo descomponen la materia orgánica para obtener energía. Los microorganismos usan parte de la energía liberada y parte de los nutrientes esenciales contenidos en la materia orgánica. Cuando éstos han usado todos los nutrientes que necesitan, el exceso de N es liberado al suelo en forma inorgánica para ser utilizado por las plantas.

La determinación del nitrógeno mineral del suelo en un momento dado tiene sólo un valor relativo, si se considera las variaciones de este elemento debidas a las diversas transformaciones microbianas que sufre en el medio edáfico, las pérdidas ocasionadas por lixiviación y extracción por los vegetales. En el balance del N asimilable por las plantas, las transformaciones de naturaleza microbiana son las que tienen mayor importancia y juegan un papel de primer orden en el funcionamiento de los diversos sistemas, ya que dan cuenta de las ganancias y pérdidas de N en el suelo y del nivel de las formas asimilables que hay en éste (Varnero, 1980).

La mayoría de los estudios de mineralización de nitrógeno han sido conducidos mediante la incubación de muestras de suelo en óptimas condiciones de temperatura y humedad (Poovarodom y Tate, 1988; Navarro *et al.*, 1991). La información así obtenida permite

determinar importantes parámetros que caracterizan la aptitud potencial de cada suelo para producir nitrógeno mineral: la fracción del nitrógeno orgánico susceptible de ser mineralizada y la velocidad del proceso (Stanford y Smith, 1972; Bachmeier *et al.*, 1993).

Los resultados mostrados en la tabla 7 indican que los sistemas SF y PSF poseen los valores acumulados de N mineral más altos en comparación con el sistema SSF; sin embargo, a pesar de que el sistema SSF posee los menores contenidos de N mineral presentes en el suelo al término del período de estudio, supera a los demás sistemas en relación a la cantidad neta de N mineralizado en el período de incubación, concordando con lo encontrado por Gutiérrez (2004), quien asevera que aunque el contenido de N mineral del suelo puede ser menor bajo una leguminosa sin aplicación de fertilizante, puede mineralizar mayores niveles de N; además, Sánchez y Palm (2006), aducen que la captura profunda de nutrientes que realizan las raíces de los árboles a profundidades a las cuales no llegan las raíces de los cultivos en los sistemas agroforestales, se puede considerar como una entrada de nutrientes adicionales por lo que respecta al cultivo, ya que pasan al suelo con la descomposición de la hojarasca de los árboles, confirmándose el efecto positivo de la leguminosa sobre este parámetro.

Probablemente, la baja producción de N mineral neto de los sistemas SF y PSF, en comparación con el sistema SSF, está relacionada con el efecto de la adición de fertilizante a dichos sistemas, y éste, a su vez, al consumo de gran parte del N mineral, adicionado vía fertilizante, de parte de los microorganismos del suelo. Los microorganismos del suelo, expresan Hodge *et al.* (2000), también utilizan las formas minerales de nitrógeno, existiendo una importante competencia por este nutriente con las plantas.

La competencia entre vegetales y microorganismos por el nitrógeno mineral es importante cuando éstos disponen de abundante sustrato carbonado, como ocurre cuando se acumula hojarasca en el suelo. La mayor parte es entonces asimilada por los microorganismos, ya que éstos son competidores más hábiles que las plantas (Palma *et al.*, 2000).

Tabla 7. Valores acumulados de nitrógeno mineralizado al término del período de incubación en los diferentes sistemas de cultivos de café. Finca San Francisco, Carazo.

mg N-min / kg suelo (Prof. 0-20 cm)							
Sistema		Calle			Hilera		
		Cont. Inicial	Cont. 30 días	Min neta	Cont. Inicial	Cont. 30 días	Min neta
SF	NH ₄ ⁺ -N	3.95	0.95		15.80	1.02	
	NO ₃ ⁻ -N	24.48	34.98		22.32	34.34	
Total		28.43	35.93	7.5	38.12	35.36	-2.76
SSF	NH ₄ ⁺ -N	2.91	1.28		2.59	1.47	
	NO ₃ ⁻ -N	10.69	27.57		14.94	26.17	
Total		13.60	28.85	15.25	17.53	27.64	10.11
PSF	NH ₄ ⁺ -N	2.10	1.39		9.15	1.41	
	NO ₃ ⁻ -N	32.31	42.28		31.53	31.00	
Total		34.41	43.67	9.26	40.68	32.41	-8.67

Mazzarino *et al.* (1993) y Arana (2003), concuerdan en que la mayor parte de la masa microbiana y la mayor actividad de la misma se encuentran en los primeros 15 cm del suelo, más precisamente entre los 8 y 10 cm de profundidad, lo que justificaría el hallazgo de inferiores niveles de N mineral en los sistemas fertilizados, asociados a la actividad inmovilizadora de la microfauna edáfica en dicha capa superficial de los suelos muestreados en el presente estudio.

La biomasa de las poblaciones microbianas en los 5 cm superficiales del suelo es de solamente 300 kg ha⁻¹, una cantidad que sugiere un efecto insignificante en el crecimiento de las plantas. Sin embargo, al localizarse la mayoría de microorganismos simbióticos y libres en hábitats preferenciales, siendo importante la rizósfera, éstos pueden afectar el crecimiento de las plantas en diferentes maneras: mejorando o afectando la nutrición de las plantas, produciendo reguladores para el crecimiento de las plantas, produciendo o degradando compuestos

fitotóxicos, antagonizando microorganismos beneficiosos y dañinos y consumiendo los nutrientes que son útiles para el metabolismo de las plantas (Ruiz, 2006).

El mismo comportamiento para la mineralización neta del N del sistema SSF se manifestó en los sitios de muestreo tanto de Calle como en Hilera.

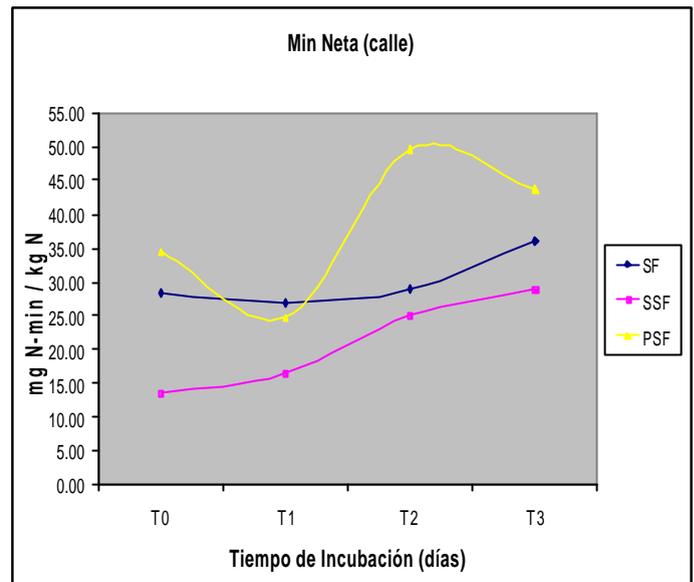
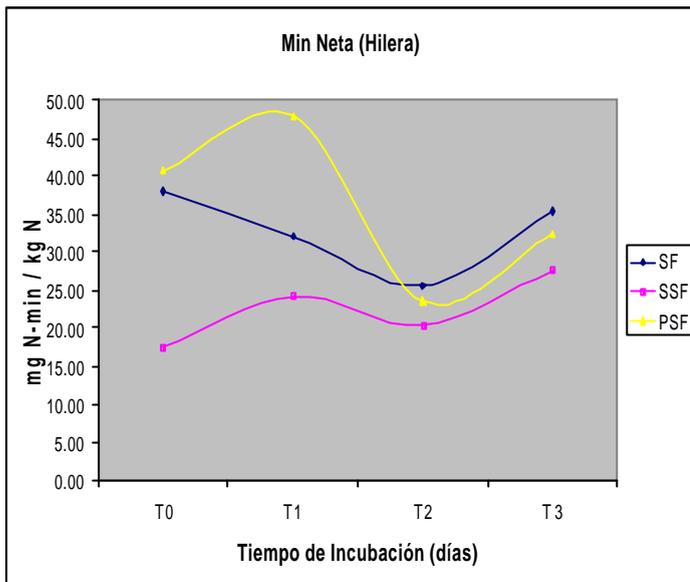
De manera específica, el comportamiento de la mineralización neta en los sistemas SF y PSF mostró valores negativos en el sitio de muestreo de Hilera; posiblemente, estas bajas del nivel de N mineral del suelo, podrían deberse en gran medida a inmobilizaciones transitorias del N mineral llevadas a cabo por los microorganismos del suelo, de acuerdo a lo señalado por Faúndez (2005), quien afirma que dicho comportamiento manifiesta un mayor consumo de nitrógeno por parte de los microorganismos que se presentan de manera más activa durante la incubación, y por tanto, necesitan mayor cantidad de nitrógeno para su desarrollo, el cual se encuentra en desmedro de la cantidad de C; esto coincide con lo agregado por Korboulewsky *et al.* (2002), quien apunta que no sólo el nitrógeno de la materia orgánica adicionada al suelo es inmobilizado, sino también el N mineral del suelo.

Un estudio realizado por García (1999), que se propuso conocer el patrón de liberación del nitrógeno que contienen algunas especies de leguminosas utilizadas como abono verde, estipula que la relación C/N de la especie *Gliricidia sepium* es de 32:1 y, además, indica que en las primeras cuatro semanas del período de estudio más del 40% del nitrógeno contenido es mineralizado. La relación C/N referida por García, según dos Santos (2006) es alta, puesto que dicho autor propone que los valores óptimos de C/N oscilan entre 15:1 y 25:1, y que con rangos mayores de 25:1 puede resultar que el nitrógeno quede atado a los microorganismos del suelo, ya que los mismos necesitarán de mayores cantidades de N en la prosecución de descomponer los materiales ricos en carbono, además de alejar al nitrógeno de las plantas que lo necesitan e impedir su disponibilidad. Al mismo propósito, Paul y Clark (1989), aseguran que la descomposición de materiales orgánicos, con relaciones C/N >25 tiene como resultado la inmobilización del N inorgánico añadido o nativo. Cuando la velocidad de descomposición de la hojarasca es menor a la de su aporte, se puede producir una inmobilización de nitrógeno, lo que se traduciría en una disminución de la productividad del sistema (Mangenot y Toutian, 1980).

6.2.1 Comportamiento del N mineral de los sistemas evaluados en los sitios de muestreo

La figura 8 muestra el comportamiento de la mineralización neta del nitrógeno en los diferentes sitios de muestreo de los sistemas en estudio durante el período de incubación. En ella se observa que en el sitio de muestreo Hilera, durante los primeros 7 días de incubación, los sistemas SSF y PSF experimentaron aumentos en los niveles del N mineral, no así el sistema SF que sufrió un descenso en dicha concentración. Sin embargo, a los 15 días de incubación, la mineralización de nitrógeno en los tres sistemas evaluados padeció una inmovilización transitoria provocada por los microorganismos presentes en el suelo, pero ya a los 30 días se observa que el proceso de mineralización continúa en los tres sistemas y se produce un notorio aumento en los valores de N mineral. Cabe notar el hecho de que, a pesar de sufrir inmovilización de nitrógeno a los 15 días de incubación, el sistema SSF fue el único en el que la tendencia de la concentración producida de N mineral fue ascendente.

Levi-Minzi *et al.* (1990), y Rodríguez y Matus (1989), aseveran que durante las primeras semanas de incubación la mineralización es más rápida, debido a que en ese período se produce la descomposición de azúcares, proteínas y celulosas, haciéndose más lenta hacia las últimas semanas donde se están mineralizando aquellos materiales más resistentes y que necesitan más tiempo para descomponerse.



T₀= 0 días T₁=7 días T₂= 15 días T₃= 30 días

Figura 8. Evolución de la mineralización neta en los diferentes sistemas de cultivo de café, a una profundidad de 0-20 cm. Finca San Francisco, Carazo.

En el sitio de muestreo Calle, la figura 8 manifiesta que el comportamiento del sistema PSF es totalmente opuesto al mostrado en el sitio de muestreo Hilera. A los 7 y a los 30 días de incubación, el N mineral de dicho sistema atraviesa procesos de inmovilización temporal. No obstante, a pesar de la retención temporal del N mineral por parte de la microfauna edáfica, al final del período de incubación el sistema PSF no reportó pérdidas en los niveles de N mineralizado neto.

Quintero y Ataroff (1998), estudiaron las variaciones de la distribución de nitrógeno de la fitomasa del café a plena exposición solar a lo largo de un año, y, según estos autores, la caída de hojarasca del cafeto presenta un máximo al final de la estación seca, ocasionando su acumulación en la superficie del suelo, la cual se descompone rápidamente haciendo que esa acumulación sea mínima a comienzos de la época lluviosa; asimismo, aseguran que esto representa una fuente no despreciable de N para el sistema, incorporando anualmente al suelo 118 kg N ha⁻¹ únicamente por caída de hojarasca, encontrándose que la mayor cantidad de nitrógeno existió en los frutos y las hojas de café (63% del total). El nitrógeno devuelto al

suelo a través de la hojarasca, que alcanza su máxima descomposición en el período marzo-abril, es ligeramente mayor que el exportado por la cosecha⁴ (Quintero y Ataroff, 1998).

Fassbender (1993), considera a la capa de mantillo como el eslabón fundamental que mantiene unidos los componentes arbóreos con el suelo; el follaje que es liberado al suelo por los árboles, incluido el café, ya sea por caída natural causada por la senescencia o por efecto de podas, constituye la capa de mantillo, ésta a su vez, por procesos de descomposición y mineralización, liberará nutrientes que podrán ser nuevamente absorbidos por las plantas.

Probablemente, el comportamiento variable del sistema PSF, en cuanto al proceso de producción de N mineral y su retención temporal por la microfauna edáfica en los respectivos lugares de muestreo, responde a lo anotado por Hodge *et al.* (2000), quien dicta que el nitrógeno mineral disponible proveniente de diversas fuentes en este sistema para las plantas en un momento dado, sea fertilizante artificial o la caída de hojarasca del mismo café, depende de la magnitud relativa de procesos simultáneos y opuestos de mineralización e inmovilización, en los cuales los microorganismos del suelo también utilizan las formas minerales de nitrógeno, existiendo una importante competencia por este nutriente con las plantas, lo que afirma el hecho de que en Calle, el sistema PSF haya mostrado valores de N mineral más altos que en Hilera.

Palma *et al.* (2000), informa que los microorganismos del suelo son competidores por los nutrientes más hábiles que las plantas. Y ya que la inmovilización es la asimilación de nitrógeno inorgánico por los microorganismos, el cual pasa a formar parte de combinaciones orgánicas en las células, este nitrógeno deja de estar por un tiempo disponible para los vegetales (Sims y Frederick, 1970), y no es inmediatamente disponible para el crecimiento de las plantas, pero mucho de este N regresa gradualmente a forma disponible a medida que los microorganismos mueren y sus cuerpos se descomponen (Fassbender y Bornemisza, 1987); por tanto, este bloqueo del nitrógeno mineral es transitorio, puesto que las moléculas orgánicas son liberadas al suelo por procesos de excreción [Russell (1976), indica que el ácido úrico es la forma nitrogenada producida por la excreción de la mayoría de los

⁴ Carvajal (1984), señala que la extracción o pérdida de nutrimentos más importante en un cafetal es la que se lleva la cosecha de café; asimismo, la cantidad de N extraída por una cosecha de 30 fanegas (1,380 kg) de café es de 43 kg.

microorganismos del suelo] o la muerte celular donde son remineralizadas (Frioni, 1990), razones que explican el ascenso y descenso de los niveles de N mineral del sistema PSF en ambos sitios de muestreo.

La inmovilización y remineralización del N proveniente de la masa microbiana por los procesos arriba citados, marcan la diferencia entre los valores de los sitios de muestreo del N mineral en este sistema al final del período de estudio.

El N mineral del sistema SF atravesó por estados de inmovilización únicamente a los 7 días de incubación; en los siguientes tiempos de incubación la tendencia fue la de estabilizarse y adquirir aumentos en la concentración de N mineral. A diferencia de los anteriores sistemas discutidos, el tratamiento SSF mantuvo un comportamiento creciente en todos los tiempos de incubación, en lo referente a la producción de N mineral en Calle. Ambos sistemas SF y SSF, al término del período de incubación, mostraron cifras positivas en la producción de N mineral neto en dicho sitio de muestreo, situación que atiende a lo antes informado por Levi-Minzi *et al.* (1990), Rodríguez y Matus (1989) y Gutiérrez (2004).

6.2.2 Comportamiento de las fracciones del N mineral del suelo

La tabla 8 refleja los valores de las fracciones del nitrógeno inorgánico durante el período de incubación. Analizando el pool de N-NH_4^+ y N-NO_3^- por separado, se puede observar que el N-NH_4^+ liberado por la descomposición de la materia orgánica nativa del suelo en los tres sistemas, es transformado a NO_3^- , de allí el signo negativo de los valores del N-NH_4^+ mostrados al final del estudio.

Tabla 8. Mineralización neta de ambas fracciones del N mineral de los sistemas en estudio al término del período de incubación.

Tratamiento	Sitio	Profundidad (cm)	mg NH_4^+ - N / kg suelo			mg NO_3^- - N / kg suelo		
			Inicial	30 días	Min neta	Inicial	30 días	Min neta
SF	Calle	0-10	1.32	0.49	-0.83	17.38	22.76	5.38
		10-20	2.63	0.46	-2.17	7.10	12.22	5.12
		Total 0-20	3.95	0.95	-3.00	24.48	34.98	10.50
	Hilera	0-10	8.37	0.51	-7.86	11.51	18.27	6.76
		10-20	7.43	0.51	-6.92	10.81	16.07	5.26
		Total 0-20	15.8	1.02	-14.78	22.32	34.34	12.02
SSF	Calle	0-10	1.28	0.80	-0.48	4.95	17.76	12.81
		10-20	1.63	0.48	-1.15	5.74	9.81	4.07
		Total 0-20	2.91	1.28	-1.63	10.69	27.57	16.88
	Hilera	0-10	1.39	0.79	-0.60	10.53	13.01	2.48
		10-20	1.20	0.68	-0.52	4.41	13.16	8.75
		Total 0-20	2.59	2.75	-1.12	14.94	26.17	11.23
PSF	Calle	0-10	1.08	0.54	-0.54	26.76	15.54	-11.22
		10-20	1.02	0.85	-0.17	5.55	26.74	21.19
		Total 0-20	2.10	1.39	-0.71	32.31	42.28	9.97
	Hilera	0-10	3.50	0.73	-2.77	8.26	18.87	10.61
		10-20	5.65	0.68	-4.97	23.27	12.13	-11.14
		Total 0-20	9.15	1.41	-7.74	31.53	31.00	-0.53

Los niveles bajos de amonio obtenidos, estarían indicando la ocurrencia de procesos que consumen amonio, como nitrificación e inmovilización, principalmente, lo que impediría su acumulación. Estos procesos de consumo de amonio son confirmados por la tendencia a incrementar las cantidades netas de N-NO_3^- en casi todas las situaciones de manejo y tiempos de incubación (anexo 3).

La inmovilización es el proceso a través del cual amonio, nitrato y otros compuestos orgánicos simples de N son asimilados por la biomasa del suelo para convertirlos en sustancias complejas durante la oxidación de sustratos. Sin embargo, el N inmovilizado quedará disponible para su mineralización a medida que se agota el sustrato y, por ende, decae la población microbiana. Si la diferencia entre mineralización e inmovilización es positiva se habla de mineralización neta, y si es negativa se habla de inmovilización neta. En una temporada generalmente se observa mineralización neta positiva, pero en breves períodos la inmovilización domina, especialmente cuando el sustrato carbonado es de mala calidad, como por ejemplo en las pajas de cereales (Ocio *et al.*, 1991).

Es gracias a la descomposición de la materia orgánica que los organismos saprófitos se procuran la energía y los nutrientes requeridos para mantener su crecimiento y su reproducción (Dommergues y Manganot, 1970). La actividad de estos organismos está directamente ligada a la disponibilidad del nitrógeno en la materia orgánica (Anderson e Ineson, 1983). En el curso de los procesos de descomposición, el nitrógeno es inmovilizado por los organismos edáficos hasta que la relación carbono/nitrógeno (C/N) del recurso disminuye y alcanza la de los tejidos microbianos, que generalmente es entre 10 y 20, según los organismos y las condiciones de crecimiento. Es dentro de este tenor que el nitrógeno es mineralizado y sirve para el aprovisionamiento de las plantas superiores. Durante esta etapa, el nitrógeno es liberado de los tejidos microbianos por autólisis, y hasta por lisis, gracias a la acción de otros organismos (Witkamp y Frank, 1970).

El N-NH_4^+ mineralizado reportó baja producción en comparación con la alta producción de N-NO_3^- . Una posible explicación a este hecho sería la ocurrencia de mineralización por la vía directa. Videla *et al.* (2005), afirman que hasta hace pocos años se consideraba que la única vía posible para la liberación de N durante la descomposición de la materia orgánica, se daba

por el ataque de enzimas extracelulares con producción de amonio; al respecto, Barraclough (1997), citado por Videla *et al.* (2005), demostró que es posible que esas enzimas extracelulares degraden la materia orgánica a aminoácidos simples, los que pueden ser absorbidos por los microorganismos, ocurriendo la desaminación en el interior de la célula, con liberación sólo del amonio en exceso a los requerimientos metabólicos de los microorganismos involucrados (vía directa).

El N-NO_3^- , sin embargo, experimentó de manera global, incrementos en los valores debido a la transformación del amonio en nitrato, concordando con los resultados del estudio de Gutiérrez (2004), quien encontró que los nitratos representan una gran proporción del N mineral del suelo, y, a su vez, los contenidos de N mineral siguen la misma tendencia que el nitrato. Asimismo, Reynolds-Vargas *et al.* (1994), encontraron que el N-NO_3^- fue la forma dominante de N mineral presente en el suelo al final del período de estudio. La nitrificación depende entre otros factores, de la disponibilidad de N-NH_4^+ , la relación C/N y la adecuada población microbiana en el suelo (Tisdale *et al.*, 1999).

VII. CONCLUSIONES

1. El sistema SF incorporó mayor cantidad de biomasa y registró el mayor aporte de N al sistema.
2. Los sistemas SF y PSF presentaron las mayores concentraciones de N mineral en ambos sitios de muestreo al término del período de incubación.
3. En el sistema SSF se mineralizó mayor cantidad de N orgánico que los sistemas SF y PSF en ambos sitios de muestreo durante el período de evaluación.
4. En los sistemas SF y PSF se registró pérdidas de N mineral en el sitio de muestreo Hilera durante el período de estudio.
5. A los 0-20 cm de profundidad, en el sitio de muestreo Hilera, el N-NH_4^+ registró mayor contenido en los sistemas examinados.
6. A los 0-20 cm de profundidad, en el sitio de muestreo Calle, el N-NO_3^- registró mayor contenido en los sistemas evaluados.
7. El sistema SSF fue el único sistema en que el proceso de producción de N mineral estimado reveló un comportamiento ascendente en ambos sitios de muestreo.
8. Los procesos de nitrificación e inmovilización se presentan como la vía de consumo preferencial del amonio producido en la mineralización de la materia orgánica.
9. El N-NO_3^- representó la mayor proporción del N mineral.

VIII. RECOMENDACIONES

- 1.** Estudiar la dinámica de mineralización de nitrógeno en sistemas agroforestales con café y a pleno sol bajo sombra de Madero Negro en otras zonas productoras de este cultivo.
- 2.** Realizar estudios similares de mineralización de nitrógeno considerando las variables climatológicas como régimen de lluvia y temperatura, las que modifican la humedad y temperatura del suelo, y procesos de pérdida que reducirían la cantidad de nitrógeno mineral en el suelo, para contribuir a optimizar la eficiencia del uso del nutriente en diversos sistemas de cultivo del cafeto.

IX. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Agrawal, G. D.; Lunkad, S. K.; Malkhed, T. 1995.** Diffuse Agriculture Nitrate Pollution of Ground Waters in India. Institute of Environmental Science. Kurukshetra, India. 14 p.
- Aguilar, G. 1995.** Variedad Costa Rica 95. ICAFE. San José, Costa Rica. 30 p.
- ANACAFE (Asociación Nacional de Caficultores). 1998.** Manual de caficultura. 3era. Edición. Guatemala. 317 p.
- Anderson, J. M.; Ineson, P. 1983.** Interactions between soil arthropods and microorganisms in carbon, nitrogen and mineral element fluxes from decomposing leaf litter. *In* Lee, J.E., McNiell, S. and Ronson, J.H., red., *Nitrogen as an Ecological Factor*. Blackwell Scientific Publication, Oxford. pp. 413-432.
- Anderson, M.; Ingram, J.M. 1993.** Tropical soil biology and fertility. A handbook of methods. 2nd. Edition. C.A.B. International. 215 p.
- Arana, V. H. 2003.** Dinámica del nitrógeno en un sistema de manejo orgánico de café (*Coffea arabica* L) asociado con Poró [*Erythrina poeppigiana* (Walpers) O.F. Cook]. CATIE, Turrialba, Costa Rica. 118 p.
- Babbar, L. I. y Zak, D. 1994.** Nitrogen cycling in coffee agroecosystems: net N mineralization and nitrification in the presence and absence of shade trees. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 48: 107-113.
- Bachmeier, O. A.; Rollan, A. A.; Núñez Vázquez, F.; Salas, H. P. 1993.** Mineralización potencial de nitrógeno. Efecto de la materia orgánica, N total y densidad aparente. *Actas del XIV Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo*. A.A.C.S. Argentina, pp.169-170.
- Baggio, A. 1982.** Establecimiento y utilización de sistema agroforestal cercos vivos de *Gliricidia sepium* en Costa Rica. Tesis, CATIE: Turrialba, Costa Rica.

Barradas, V. L; Fanjul, L. 1986. Microclimatic characterization of shaded and open-grow coffee (*Coffea arabica L*) plantations in Mexico. Agriculture Forestal Meteorology 38:101-112.

Beer, J. 1988. Litter production and nutrient cycling in Coffee (*Coffea arabica*) or (*Theobroma cacao*) plantations with shade trees. Agroforestry Systems 7: 103-114.

Bertrand, B; Aguilar, G; Santacreo, R; Anzuelo, F. 1999. El mejoramiento genético en América Central. En: Bertrand, B; Rapidel, B. (Eds). Desafíos de la Caficultura en Centroamérica. San José, Costa Rica. CIRAD, IICA. 407-456 p.

Bertsch, F. 1995. La Fertilidad de los Suelos y su Manejo. Asociación Costarricense de la Ciencia del Suelo. San José. 157 p.

Cáceres, D. V. 1997. Efecto de dosis y fraccionamiento del nitrógeno en el rendimiento del café (*Coffea arabica*) en tres fincas de Nicaragua. En Memorias del XVIII Simposio Latinoamericano de Caficultura. IICA, Costa Rica. P 205-210.

Carvajal, J. F. 1984. Cafeto: cultivo y fertilización. Berna, Suiza, Instituto de la Potasa.

Castro, J. E; Díaz, D. C. 2004. Evaluación de tres sistemas de manejo sobre el crecimiento, estructura productiva y calidad del café (*Coffea arabica*) variedad Costa Rica 95. Tesis Ing. Agrónomo. UNA. Managua, Nicaragua. 68 p.

Cisnero, B.; Arias V., J. E.; Fonseca, C. C.; Ramírez, M. G.; Ramírez R., J. E.; Obando, J. J. 2000. Estudio del comportamiento agroproductivo de los materiales genéticos caturra, variedad costarrica 95, catuaí y catimor T5175 en ocho zonas cafetaleras en Costa Rica. En: XIX Simposio Latinoamericano de Caficultura. Costa Rica. 243-250 p.

Coyne, M., 1999. Microbiología del suelo: un enfoque exploratorio. Editorial Paraninfo, Madrid, España. 416p.

Chang, F. H.; Broadbent, F. E. 1982. Influence of trace metals on some soil nitrogen transformations. *J. Environ. Qual.* 11:1-4.

Dommergues, Y.; Mangenot, F. 1970. *Écologie microbienne du sol.* Masson et Cie., édit. Paris, 796 pp.

Enciclopedia Electrónica Microsoft Encarta 2006.

FAO. 1986. Guía de fertilizantes y nutrición vegetal. Boletín 9: Fertilizantes y nutrición vegetal. Roma. 198 p.

Fassbender, H. W. 1993. Modelos edafológicos de sistemas agroforestales. 2da edición. Serie de materiales de enseñanza (no. 29). Turrialba, Costa Rica. 491 p.

_____ ; **Bornemisza, E. 1987.** Química de suelos con énfasis en suelos de América Latina. Colección de libros y materiales educativos N° 81. IICA, San José, Costa Rica. 420 p.

_____. **1984.** Química de suelos con énfasis en suelos de América Latina. IICA, San José, Costa Rica. 422 p.

Faúndez C., P. 2005. Actividad microbiológica global en suelos acondicionados con biosólidos cloacales frescos y comportados con residuos forestales. Tesis de Ing. Agrón. Chile. 61 p.

Frioni, L. 1990. Ecología microbiana del suelo. Ediciones de la Universidad de la República. Montevideo, Uruguay. 519 p.

García C., L. 1999. Las leguminosas, fuente alternativa de nutrientes para los cultivos. Universidad Nacional Agraria. Nicaragua. En www.inta.gob.ni

Giller, K. E.; Wilson, K. J. 1991. Nitrogen fixation in tropical cropping systems. CAB International. Oxon, UK.

Glover, N.; Beer, J. 1984. Spatial and temporal fluctuations of litterfall in the agroforestry associations *Coffea arabica* var. caturra-*Erythrina poeppigiana* and *C. arabica* var. caturra-*E. poeppigiana*-*Cordia alliodora*. CATIE, Turrialba, Costa Rica. 50 p.

Gutiérrez C., M. 2004. Disponibilidad de nitrógeno en el suelo bajo especies maderables y leguminosas usadas como sombra de *Coffea arabica*. En Agroforestería de las Américas. N° 41-42.

Henry, D. F.; Boyd, G. E. 1988. Soil and fertilizer nitrogen. Soil fertility. p. 62-75. John Wiley and Sons, New York, USA.

Herrera, R.; Aranguren, J.; Escalante; Cuenca, G.; Accardi, A., Navidad, E.;Toro, M. 1985. Plantaciones de cacao y café bajo árboles de sombra en Venezuela. En Beer, J.W.; Fassbender, H. W. y Heuveldop, J. 1989. *Avances en la Investigación agroforestal: Memoria del seminario*. Turrialba, Costa Rica, CATIE-GTZ, p.196-205.

Hodge, A.; Stewart, J.; Robinson, D.; Griffiths, B. S.; Fitter, A. H. 2000. Competition between roots and soil microorganisms for nutrients from nitrogen-rich patches of varying complexity. *J Ecol.* 88:150-164.

Hüstch, B. 1990. Effect of tillage practice on nitrogen dynamics in soils. "Nitrogen metabolism in Plants". Giessen.

ICAFFE (Instituto de Café de Costa Rica). 1995. Manual de recomendaciones para el cultivo del café. Costa Rica. 194 p.

- Korboulewsky, N.; Dupouyet, S.; Bonin, G. 2002.** Environmental Risks of Applying Sewage Sludge Compost to Vineyards: Carbon, Heavy Metals, Nitrogen, and Phosphorous Accumulation. *J. Environmental Qual.* 31: 1522-1527.
- Levi-Minzi, R.; Riffaldi, R.; Saiozzi, A. 1990.** Carbon mineralization in soil amended with different organic materials. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 31: 325-335.
- Lyngbaeck, A; Muschler, R; Sinclair, F. 2001.** Productivity and profitability of multistrata organic versus conventional coffee farms. Costa Rica. In *Agroforestry Systems* 53: 205-213.
- Loll, M. J.; Bollag, J. M. 1983.** Protein transformation in soil. *Adv. Agron.* 36, 351-382.
- Lyttleton, L; Buckman, H. 1952.** Edafología: Naturaleza y Propiedades del suelo. Argentina. 479 p.
- Malavolta, E. 1981.** Nutrição mineral e adubação do cafeeiro. In *Nutricao e adubacao do cafeeiro*. Ed. E. Malavolta, T. Yamada e J. A. Guidolin. Instituto da Potassa & Fosfato, Piracicaba. 138–178 pp.
- Mangenot, F.; Toutian, F. 1980.** Actualités d'Ecologie Forestière. P. Pearson (Ed) Gauthiers-Villars, París. p. 3-69.
- Mardóñez, R. 2000.** Variabilidad espacial de la mineralización de nitrógeno. Tesis Ingeniero Agrónomo. Chillán. Universidad de Concepción, Chile. 23 p.
- Mazzarino, M. J.; Szott, L.; Jiménez, M. 1993.** Dynamics of soil total C and N, microbial biomass, and water soluble C in tropical agroecosystem. *Soil Biology and Biochemistry.* 25/2: p. 205-214.
- Mela, P. 1963.** Tratado de Edafología y sus distintas aplicaciones. 2ª Edición. Ed. Agrociencia. Zaragoza. 614 p.

- Melchor, I.; Vargas, J.; Velásquez, A. 2005.** Aboveground biomass production and nitrogen content in *Gliricidia sepium* (Jacq.) Walp. Under several pruning regimes. INCI, Mar 2005, vol.30, no.3, p.151-158.
- Montagnini, F.; Buschbacher, R. 1989.** Nitrification rates in two undisturbed tropical rain forests and three slash-and-burn sites of the Venezuelan Amazon. *Biotropica* 21:9-14.
- Mulvaney, R. L. 1996.** Nitrogen Inorganic Forms. *Methods of Soil Analysis. Part 3.* Soil Sci. Soc. Am., Inc. Madison, Wisconsin, USA, p. 1123-1131, 1146-1160.
- Muschler, R. 2000.** Árboles en cafetales. Serie de módulos de enseñanza agroforestal. No. 5. CATIE. Costa Rica. Proyecto Agroforestal CATIE/GTZ. 139 p.
- Navarro C.; Echeverría, H.; Fonalleras, M; Manavella, F. 1991.** Efecto de los contenidos de humedad sobre la mineralización del nitrógeno en suelos del sudeste bonaerense. *Ciencia del Suelo*, 9 (1-2):13-19.
- Ocio, J. A.; Martínez, J.; Brooks, P. C. 1991.** Contribution of straw derived N following incorporation of cereal straw to soil. *Soil. Biol. Biochem.* 23: 655-659.
- Ortega, R.A.; Ortega, J. A.; Foster, W. 2002.** Technical-economical feasibility of site-specific nitrogen management in traditional crops in Chile. p. 1842-1857. In P.C. Roberts (ed.) *Proceedings of the 6th Conference on Precision Agriculture and Other Precision Resources Management.* Minneapolis, Minnesota, USA. July 14-17. ASA, CSSA, SSSA, Madison, Wisconsin, USA.
- Otárola, A. 1995.** Cercas vivas de madero negro: Práctica Agroforestal para sitios con estación seca marcada. *En Agroforestería de las Américas.* 2(5): 24-30.
- Palma R., M.; Defrieri, R. L.; Tortarolo, M. F.; Prause, J.; Gallardo, J. F. 2000.** Seasonal changes of bioelements in the litter and their potential return to green leaves in four species of the Argentine Subtropical Forest. *Annals of Botany* 85: 181-186.

Paul, E. A.; Clark, F. 1989. Transformation of nitrogen between the organic and inorganic phase and to nitrate. In: Soil microbiology and biochemistry. Academic Press, San Diego, 131-146.

Pezo, D.; Ibrahim, M. 1998. Sistemas silvopastoriles. Módulo de enseñanza agroforestal No. 2. CATIE, Turrialba. Costa Rica. 258 p.

Poovarodom, S.; Tate, R. L. 1988. Nitrogen mineralization rates of the Acidic, Xeric soils of the New Jersey pinelands: Laboratory studies. *Soil Science*, 145: 337-344.

Quintero, J. S.; Ataroff, M. 1998. Contenido y flujos de nitrógeno en la biomasa y hojarasca de un cafetal a plena exposición solar en Los Andes venezolanos. *Rev. Fac. Agron. (LUZ)*. 1998, 15: 501-514

Reganold, J; Palmer, A; Lockhart, J; Mac Gregor, A. 1993. Soil quality and financial performance of bio-dynamic and conventional farms in New Zealand. In *Science* 260: 344-349.

Renderos, R. 2001. Efecto de sistemas agroforestales *Café-Eucalyptus deglupta* sobre la contaminación del agua con nitratos en microcuencas de la zona sur de Costa Rica. CATIE, Turrialba, Costa Rica, 80 p.

Reynolds-Vargas, J. S.; Richter, D. D.; Bornemisza, E. 1994. Environmental impacts of nitrification and nitrate adsorption in fertilized andisols in the Valle Central of Costa Rica. *Soil Science Society*. 157 (52): 289-299.

Rodríguez, L. 2000. Análisis de la Cadena Agroalimentaria del Café en Nicaragua

Rodríguez, J.; Matus, F. 1989. Modelo simple para estimar el suministro de nitrógeno en el suelo. *Ciencia e Investigación Agraria* 16: 33-46.

Ruiz, P. O. 2006. Importancia de los microorganismos del suelo para los sistemas agroforestales. En www.fao.org

Russell, W. 1976. Soil Condition and Plant Growth. 10th ed. Hong Kong. 849 p.

Repertorium Botanices Systematicae. 2006. 1(4): 679. www.conabio.gob.mx

Salisbury, F. B.; Ross, C. W. 1994. Fisiología Vegetal 4^a ed. Editorial Iberoamérica. México D.C. 759 p.

Sánchez, P. A.; Palm, C. A. 2006. Reciclaje de nutrientes y agrosilvicultura en África. En www.fao.org

dos Santos M., J. 2006. Uso de abonos verdes. Paraguay. En www.mailxmail.com

Sims, J. L.; Frederick, L. R. 1970. Nitrogen immobilization and decomposition of corn residue in soil and sand as affected by residue particle size. Soil Science 109:355-361.

Smith, S.J.; Cassel, D. K. 1991. Estimating nitrate leaching in soil materials. Managing nitrogen for groundwater quality and farm profitability. Soil Science Society of America. Wisconsin, USA. 357 p.

Solórzano, P. P. S. 1997. Fertilidad de suelo, su manejo en la producción agrícola. Alcance (51) Universidad Central de Venezuela. Facultad de Agronomía. Maracay-Venezuela. 201p.

Sommer, K. 1978. Use of radioisotopes in agriculture. Report to the Government of Costa Rica. International Atomic Energy Agency -TA. Report no. 1360.

Stanford, G.; Frere, M. H.; Schwaninger. D. H. 1973. Temperature coefficient of soil nitrogen mineralization. Soil Sci. 115:321-323.

_____ ; **Smith, S. J. 1972.** Nitrogen mineralization potentials of soils. *Soil Science Society of America Proc.* 36, 465-472.

Tisdale, S. L.; Beaton, J. D.; Havlin, J. L.; Nelson, W. L. 1999. Nitrogen transformations in soils. p. 108-135. *In* Tisdale, S.L., J.D. Beaton, J.L. Havlin, and W.L. Nelson. Soil fertility and fertilizers: An introduction to nutrient management. 6th edition. Prentice-Hall, New Jersey, USA.

Urquiaga, S.; Zapata, F. 2000. Manejo eficiente de la fertilización nitrogenada de cultivos anuales en América Latina y el Caribe. Ed. Génesis, Brasil. 110 p.

Vaast, P; Snoeck, D. 1999. Hacia un manejo sostenible de la materia orgánica y de la fertilidad biológica de los suelos cafetaleros. En Bertrand B; Rapidel, B. Desafíos de la Caficultura en Centroamérica. CIRAD, IICA. Costa Rica. P 139-169.

Varnero, M. T. 1980. Mineralización *in vitro* del nitrógeno orgánico en un suelo granítico. *Inv. Agrícola. Chile.* 6(2): p. 55-59.

Videla, C.; Pazos, A.; Trivelin, P. C.; Echeverría, H. E.; Studert, G. A. 2005. Mineralización bruta de nitrógeno bajo labranza convencional, siembra directa y pastura. *Cienc. Suelo* v. 23 n°2. Buenos Aires. Ago/dic.

Vitousek, P. M.; Aber, J.; Howarth, R. O.; Likens, G. E.; Matson, P. A.; Schindler, D. W.; Schlesinger, W. H.; Tilman, G. D. 1997. Human Alteration of the Global Cycle: Causes and Consequences. *Issues in Ecology* (1): 1-15.

_____ ; **Denslow, J. S. 1986.** Nitrogen and phosphorus availability in treefalls gaps of a lowland tropical rainforest. *J. Ecol.* 74: 1167-1178.

_____ ; **Matson, P. A. 1984.** Mechanism of nitrogen retention in forest ecosystems: A field experiment. *Science*, 225:51-52.

Witkamp, M.; Frank, M. L. 1970. Effect of temperature, rainfall and fauna on transfer of Cesium-137, K, Mg and mass in consumer-decomposer microcosms. *Ecology* 51: 465-474.

Willey, R. W. 1975. El uso de sombra en café y cacao. In *Horticultural Abstract* 45(12): 791-798.

Zamora, Q. L. 1998. Manual de Recomendaciones para el cultivo del Café. ICAFE. San José, Costa Rica. 195 p.

Anexos

Anexo 1. Descripción de la variedad de café Costa Rica 95

La variedad Costa Rica 95 es producto de la selección efectuada por el ICAFE de Costa Rica a partir de la serie T-8600 introducida y evaluada en el CATIE por PROMECAFE en generación F5. La variedad Costa Rica 95 es de porte pequeño con brotes bronceados y de bandolas muy cortas, fruto y grano de tamaño grande; hojas nuevas de color café o bronce (ANACAFE, 1998)

Este Catimor en Costa Rica y en algunos otros países ha presentado resultados satisfactorios en cuanto a producción, superando en algunas ocasiones variedades comerciales como caturra y catuaí (Cisnero *et al.*, 2000). Tiene muy buenas características de grano y buena respuesta a la poda. Se adapta muy bien en ambientes favorables propios del cultivo (Zamora, 1998).

Esta variedad, se puede sembrar a las mismas densidades de siembra que el Caturra. Es una variedad que produce entre 25 y 35% más que las variedades Caturra y Catuaí, según las zonas. Para mantener los altos rendimientos, requiere una fuerte fertilización, si no se agota a partir del tercer año de producción. El grano es más grande (se acerca al Typica) y supera un poco el tamaño del T-5175 o del Catuaí y significativamente el tamaño del Caturra (respectivamente: 67.90 % contra 65.17 %, 63.30 % y 53.99 % sobre un tamiz de 17/64 pulgadas). Presenta un poco más caracoles que el Caturra, pero igual que el Catuaí (alrededor de 6 a 10 % en promedio de varias zonas). Su alta resistencia a la roya lo hace recomendable principalmente para las zonas donde existe una mayor incidencia de roya (Bertrand *et al.*, 1999).

Anexo 2. Características agroproductivas de la variedad Costa Rica 95.

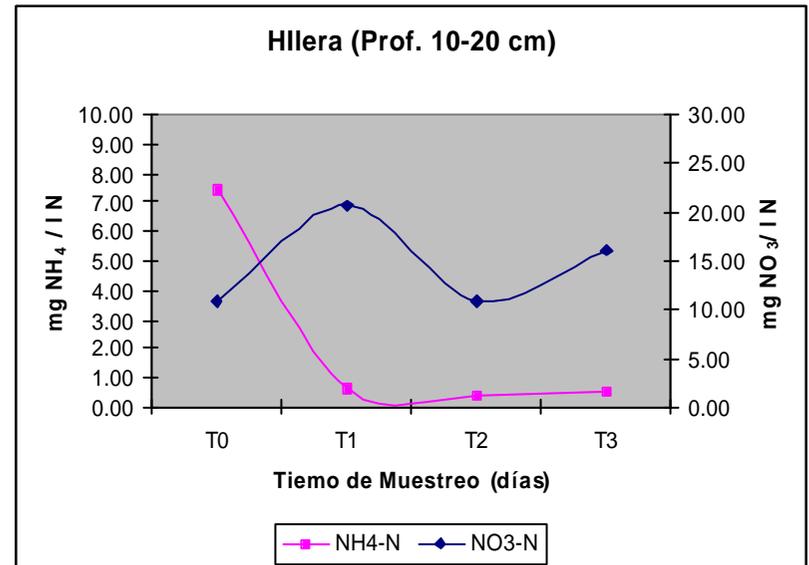
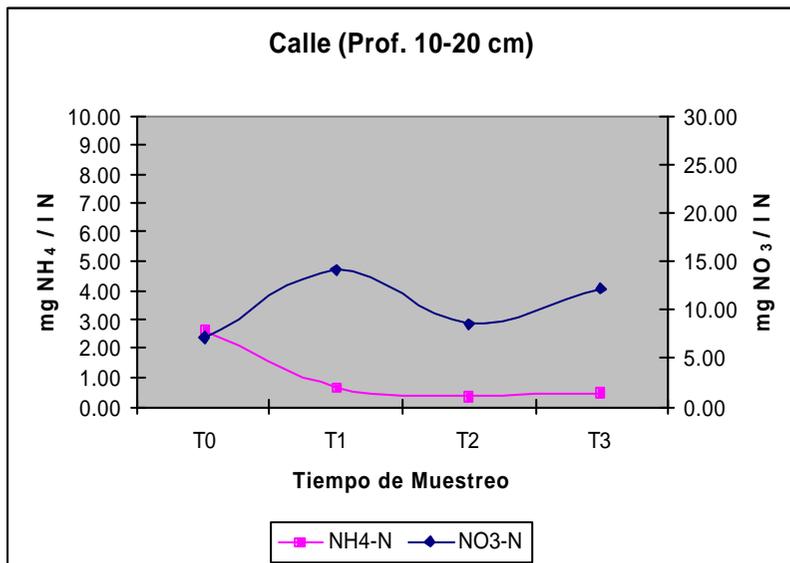
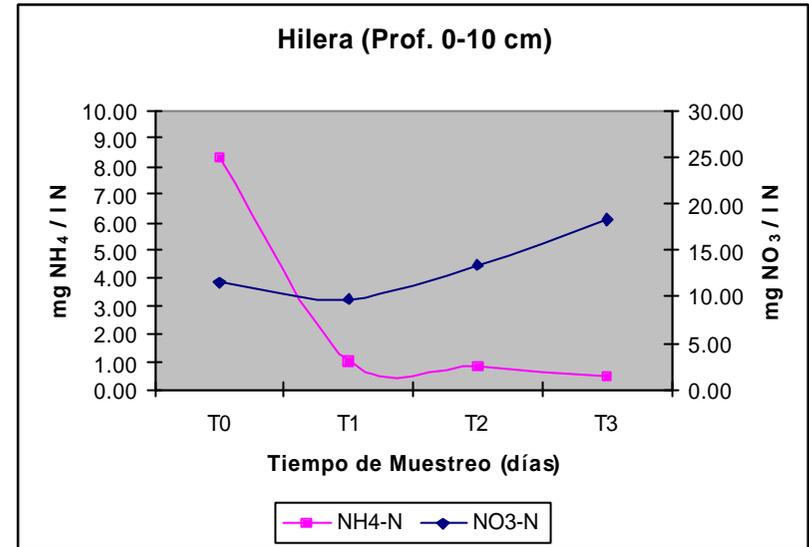
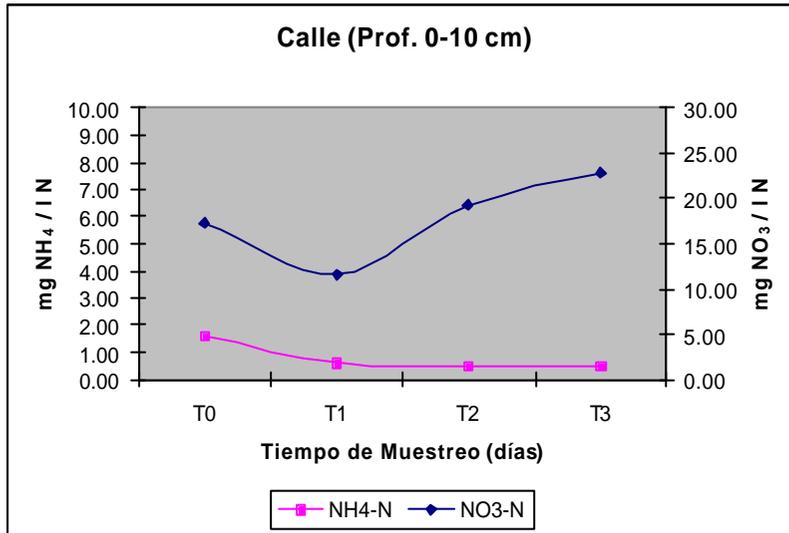
I. Fenotípicas	
1.-Porte	Bajo
a. Tamaño planta	Bajo en comparación con otras variedades
b. Entre nudos	Cortos
c. Heredabilidad del porte	Alto
2.-Brotos (Hojas Apicales)	Bronceado (café) oscuro
3.-Mal formación	Piramidal
4.-Longitud de bandolas	Muy corta
5.-Tamaño y tonalidad de hoja	Media y muy oscuro
II. Agronómicas	
1.-Precocidad	Alto
2.-Vigor	Alto
3.-Ciclos productivos	Cortos
4.-Bianualidad	Marcada
5.-Densidad	7086 plantas por hectárea
6.-Densidad recomendada	1.68 m. X 0.84 m. Altitudes bajas 2.0 m x 1.0 m. Altitudes altas
III. Fruto	
1.-Coloración	Rojo
2.-Resistencia a la caída	Alto
3.-Fruto vano	<5,0 %
4.-Época de maduración	Temprana a media
IV. Enfermedades y plagas	
1.-Ojo de gallo (<i>Mycena citricolor</i>)	Tolerancia Moderada
2.-Chasparria (<i>Cercospora coffeicola</i>)	Tolerancia Media
3.-Rosada (<i>Corticium salminocolor</i>)	Susceptible
4.-Roya (<i>Hemileia vastatrix</i> Berk.)	Resistente

5.-CBD (<i>Colletotrichum coffeanum</i> Noack. Sensed Hindorf.)	Susceptible
6.-Broca (<i>Hypothenemus hampei</i>) Nematodos (<i>Pratylenchus</i> sp y <i>Meloidogyne</i> sp)	Susceptible
V. Físicas del grano	
1.- Tamaño	Grande (> 17/64?)
2.- Anormalidades	<12,0 %
3.- Forma	Typica
4.- Peso/ Volumen	Alto
VI. Producción	Alta

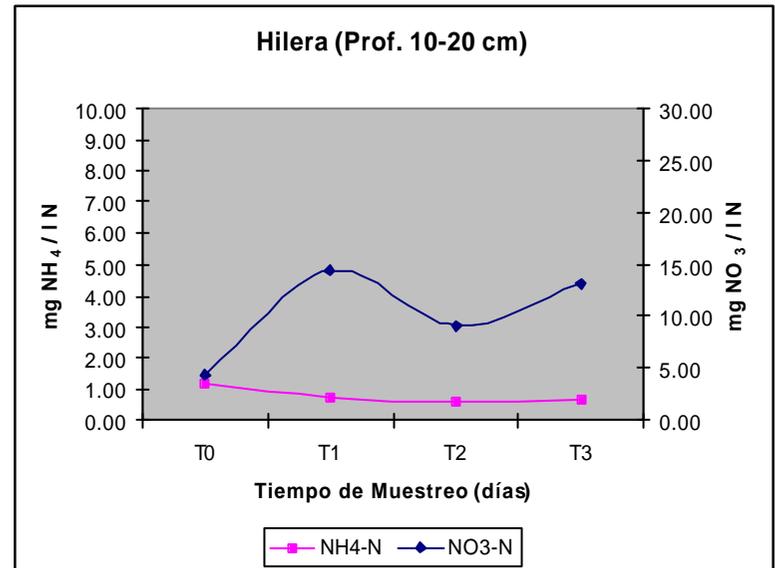
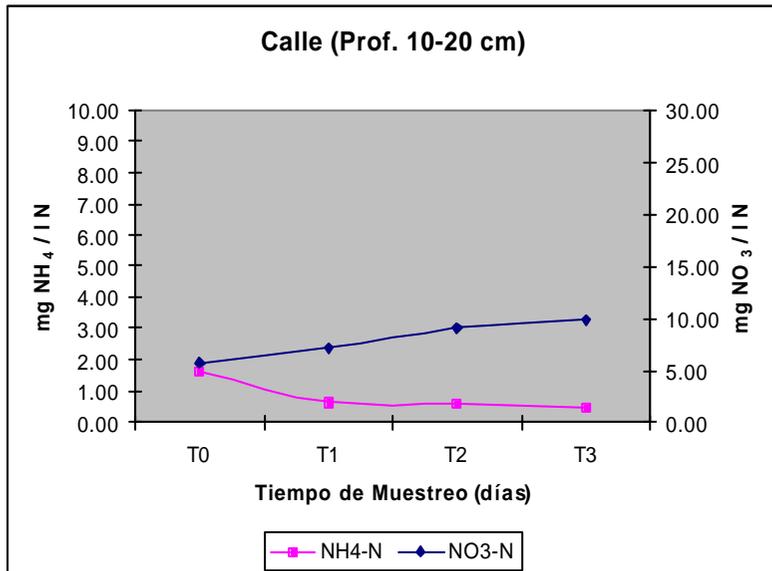
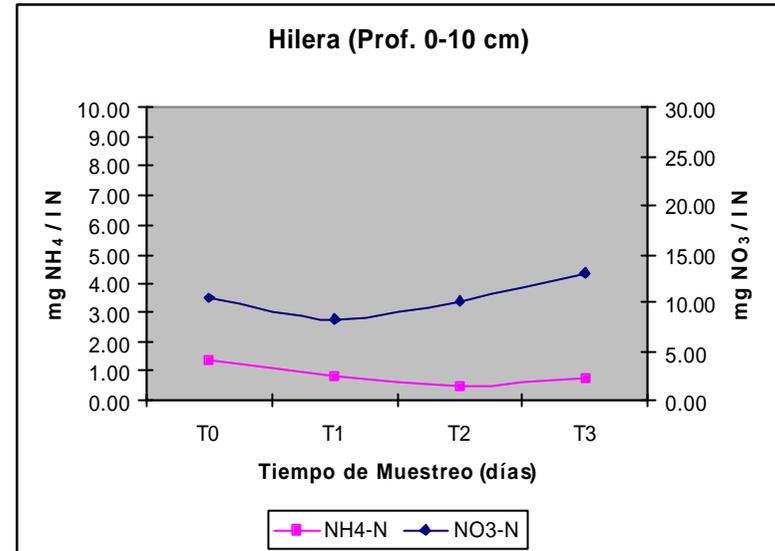
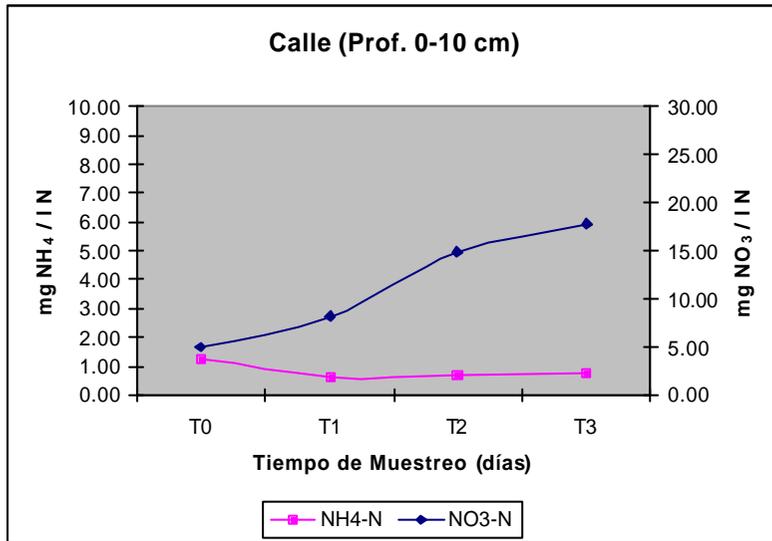
Fuente: Aguilar, 1995.

Anexo 3. Comportamiento de las fracciones del nitrógeno mineral en cada tratamiento

a) Café con Sombra con Fertilizante (SF)



b) Café con Sombra sin Fertilizante (SSF)



c) Café a Pleno Sol con Fertilizante (PSF)

