

Thesis
G984d1
e.2

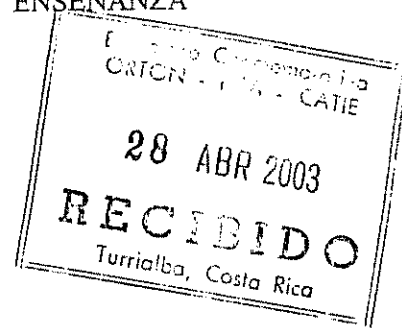
TIE Centro Agronómico Tropical
de Investigación y Enseñanza



Disponibilidad y dinámica de nitrógeno en el suelo bajo especies maderables y leguminosas usadas como sombra en sistemas de café, en la subcuenca del Río Grande del General

MARTHA GUTIÉRREZ CASTILLO

CENTRO AGRONÓMICO TROPICAL DE INVESTIGACIÓN Y ENSEÑANZA
ESCUELA DE POSGRADO



// Disponibilidad y dinámica de nitrógeno en el suelo bajo especies maderables y leguminosas usadas como sombra en sistemas de café, en la subcuenca del Río Grande del General

Tesis sometida a la consideración de la Escuela de Posgraduados, Programa de Educación para el Desarrollo y la Conservación del Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza, como requisito parcial para optar por el grado de:

Magister Scientiae

POR

MARTHA GUTIÉRREZ CASTILLO

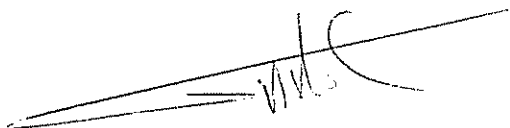
Turrialba, Costa Rica

2002

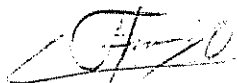
Esta tesis ha sido aceptada en su presente forma por el Programa de Educación para el Desarrollo y la Conservación y la Escuela de Posgrado del CATIE y aprobada por el Comité Consejero del Estudiante como requisito parcial para optar por el grado de:

MAGISTER SCIENTIAE

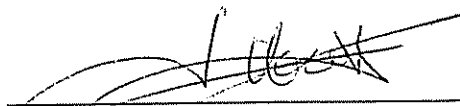
FIRMANTES:



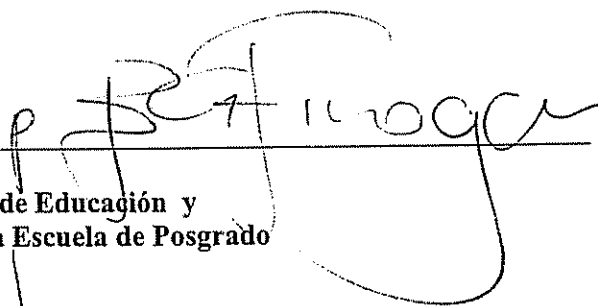
Jean Michel Harmand, Ph.D.
Consejero Principal



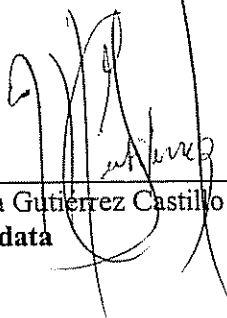
Francisco Jiménez, Ph.D.
Miembro Comité Consejero



Philippe Vaast, Ph.D.
Miembro Comité Consejero



Ali Moslemi, Ph.D.
**Director Programa de Educación y
Decano de la Escuela de Posgrado**



Martha Gutiérrez Castillo
Candidata

DEDICATORIA

A mi invaluable tesoro, mis hijos Carlos Josué y Juan Pablo que son la fortaleza de mi vida

A mi amado esposo, Rodolfo Munguía con quien comparto mi vida

A mi madre querida Maria de Jesús por su invaluable amor

A mi abuelita, Estebana a quien adoro

AGRADECIMIENTO

A Dios, por su protección en todos los momentos de mi existencia

Mi reconocimiento y agradecimiento al comité asesor, en las personas de Jean-Michel Harmand, Ph. D. consejero principal; Francisco Jiménez, D. Sc. Y Philippe Vaast, Ph. D. miembros del comité, por su valiosa asesoría y contribución a mi trabajo de investigación y conocimiento profesional.

A Etienne Dambrine Ph. D del INRA de Francia, por su apoyo y sugerencias en el montaje de este trabajo de investigación.

Al gobierno de Suecia, a través de Agencia Sueca de Desarrollo Internacional (ASDI), por su apoyo financiero para la realización de mis estudios de maestría en CATIE

Agradezco al Centro Agronómico Tropical de Investigación y enseñanza (CATIE) y a la Escuela de Posgraduados en particular, por darme la oportunidad de mejorar mis conocimientos científicos y técnicos

Al claustro de Docentes de la Escuela de Posgraduados por el aporte y enriquecimiento a mi conocimiento profesional, en especial a Tamara Benjamín Ph. D por su apoyo en el comité asesor.

Agradezco al proyecto Coffee Agroforestry Systems in Central América (CASCA) financiado con fondos del pueblo y gobierno de Francia con sede en CATIE (Turrialba), por el apoyo económico en los análisis realizados en el laboratorio aquí en Costa Rica como en Francia y Edimburgo, Escocía

Me permito agradecer de la manera más cordial a la empresas Verde Vigor S A. y en especial a su gerente Sr Marcos Céspedes, que me hayan permitido desarrollar mi trabajo de investigación en las áreas productivas de café en las fincas Verde Vigor y Santa Fe, y el apoyo con recurso humanos y financieros conque conté

A la Cooperativa Coopeagri R.L. en la persona de Hugo Carranza, Gerente General y Mariano Ruíz responsable de la cooperativa por facilitar el desarrollo de mi trabajo de investigación en su áreas productivas de café asociadas con árboles de sombra

A ICAFE en la sede Regional de Pérez Zeledón, especialmente al Ing Recaredo Mesen Z. por su valiosa información requeridas para las parcelas en el estudio

Al Señor Steven Weber, por permitir el acceso a sus plantaciones privadas de café en la finca la Repunta S A. para recolección de material vegetal

Al personal del Laboratorio de Suelos, particularmente a Patricia Leandro, por su empeño en la calidad de los análisis

Al Área de Fitoprotección Vegetal, en especial al personal del laboratorio de Fitopatología por su apoyo operativo e instalaciones de la estructura de invernadero y muy en particular a la Dr Vera Sánchez, Jefe del laboratorio

A Gustavo López, por su asistencia en el análisis estadístico

A Rudi Van Kanten, por proporcionar información valiosa de la zona en estudio

A los funcionarios de la Biblioteca Orton, por su colaboración con la búsqueda de la información

Agradecer incommensurablemente por su apoyo incondicional a mis hermanas queridas, Darling, Bryceida, Celia María, Lisette, cuñados David Urcuyo, Cruz Munguia y toda mi familia que han permitido alcanzar con éxito la superación en mis estudios de maestría en CATIE

Agradecer a la Universidad Nacional Agraria por haberme permitido el ingreso al CATIE y mantener el apoyo institucional durante el período de la realización de la maestría.

A mis compañeros de la promoción 2001, quienes me mostraron su solidaridad especialmente a Alfredo, Mauricio, Héctor, Pedro, James, Lester, Rovell, Maria de Jesús, Zuyapa, Karla y Elda

CONTENIDO

	PÁGINA
Lista de cuadros	viii
Lista de figuras	x
Lista de fotografía	x
Lista de anexos	xi
Resumen	xii
Abstract	xiv
1 INTRODUCCIÓN	1
1.1 - El problema	1
1.2 - La importancia	3
1.3 - Objetivos	4
1.3.1 - Objetivo general	4
1.3.2 - Objetivos específicos	4
1.4 - Hipótesis	4
2. - REVISIÓN DE LITERATURA	5
2.1 - Formas del Nitrógeno	5
2.2 - Proceso de mineralización	6
2.2.1 - Aminización	6
2.2.2 - Amonificación	6
2.2.3 - Nitrificación	7
2.2.4 - Factores que influyen sobre la mineralización y la nitrificación del Nitrógeno del suelo	8
2.3 - Inmovilización	9
2.4 - Lixiviación	10
2.5 - Volatilización	10
2.6 - Desnitrificación	10
2.7 - Métodos para estimar la mineralización del nitrógeno en el suelo	12
2.7.1 Incubación in situ	12
2.7.2 - Métodos de incubación en laboratorio	12
2.7.2.1. - Incubación aeróbica en el laboratorio	12
2.7.2.2 - Incubación anaeróbica en el laboratorio	13

3- MATERIALES Y MÉTODOS	14
3.1 - Localización y condiciones del área de estudio	14
3.2 - Caracterización de los sistemas agroforestales en estudio	15
3.3 - Área de muestreo, selección de árboles y obtención de muestras de suelo	18
3.4 - Análisis de los suelos	19
3.5 - Experimento sobre mineralización aeróbica de Nitrógeno “in vitro”	21
3.6 - Experimento sobre desnitrificación	21
3.7 - Liberación de N por diferentes residuos de árboles de sombra	23
3.7.1 - Recolección y análisis de hojarasca y raíces finas de árboles	23
3.7.2 - Incubación de los residuos vegetales en mezcla con suelo	24
3.8 - Experimento de disponibilidad de Nitrógeno en invernadero	25
3.9 - Análisis de los datos	26
3.9.1 - Descripción de los modelos estadísticos aplicados a los datos	26
3.9.2 - Aplicación de modelos a variables respuestas	27
4 - RESULTADOS Y DISCUSIÓN	29
4.1 - Características de los suelos en tres sitios cultivados con café bajo diferentes árboles de sombra	29
4.1.1 - Comparación de las características de los suelos de los diferentes sitios	29
4.1.2 - Comparación de las características de los suelos bajo los diferentes tipos de sombra	31
4.2 - Dinámica del N mineral del suelo en incubación aeróbica “in vitro”	33
4.3- Estimación de la pérdida de nitrógeno en forma de óxido nítrico (N ₂ O) durante la incubación aeróbica	37
4.4 - Liberación de Nitrógeno de hojas y raíces de las especies de sombra	40
4.5- Producción de biomasa y extracción de nitrógeno por <i>Zea mays</i> , en condiciones de invernadero	43
5 - CONCLUSIONES	49
6 - RECOMENDACIONES	49
7 - REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	51
8 - ANEXOS	57

LISTA DE CUADROS

CUADRO		PÁGINA
1	Especies arbóreas establecidas en los tres sitios de la subcuenca del Río Grande del General	15
2	Características del café en los diferentes sitios en estudio	17
3	Características de manejo de las especies de sombra en los diferentes sitios en estudio	17
4	Fertilización aplicada en el sistema agroforestal café asociado con árboles de sombra para el 2001 en las fincas Verde Vigor, Finca Santa Fe y San Pedro	18
5	Peso fresco de material vegetal (g) para 60 g de suelo fresco (equivalente en peso seco a una porción de 2% de material vegetal)	25
6	Modelos aplicados a variables respuestas de los diferentes experimentos de investigación	27
7	Resultados de ANDEVA del diseño completamente al azar con efecto anidado sobre las características químicas de los suelos con $P > F$	29
8	Propiedades químicas de la capa del suelo 0-10 cm en los tres sitios bajo el sistema café <i>Eucalyptus deglupta</i>	30
9	Características físicas de la capa del suelo 0-10 cm y uso anterior de la tierra en Verde Vigor, Santa Fe y San Pedro	31
10	Propiedades químicas de la capa del suelo (0-10 cm) bajo los diferentes tipos de sombra dentro de cada sitio	33
11	Nitrógeno mineralizado acumulado y tasas de pérdidas (mineralización negativa) durante la incubación aeróbica "in vitro" bajo dos condiciones de humedad del suelo en los tres sitios	36
12	Tasas de pérdidas registradas durante la incubación aeróbica "in vitro" bajo dos condiciones de humedad	37
13	Correlaciones entre las tasas de desaparición del nitrógeno y N_{min} inicial del suelo en estado más y menos húmedos de los suelos de Verde vigor, Santa Fe y San Pedro.	37
14	N liberado en forma de $N-N_2O$ durante una hora después de un día de incubación aeróbica	40
15	Concentración de N en los residuos de especies de sombra	41
16	N mineral liberado por residuos vegetales (en mezcla con suelo) después de un día y 7 días de incubación aeróbica en laboratorio	42
17	Relación entre la liberación de N por los residuos y la concentración inicial en hojas y raíces	43

18	Producción de biomasa (MS) y extracción de nitrógeno por el maíz cultivado durante 45 días en suelos provenientes de los diferentes sitios bajo <i>Eucalyptus deglupta</i>	44
19	Correlaciones entre características químicas del suelo con la biomasa y el contenido de N en maíz cultivado en suelos de los distintos tratamientos y sitios	47
20	Correlaciones entre la biomasa, el contenido de N en maíz y las características químicas del suelo y la calidad de los residuos de los árboles en suelos provenientes de San Pedro	48

LISTA DE FIGURAS

FIGURA		PÁGINA
1	Localización del área de estudio	14
2	Esquema representativo de la extracción de las submuestras de suelo por árbol	18
3	Evolución del contenido de N mineral del suelo en incubación aeróbica en laboratorio bajo diferentes condiciones de humedad	34
4	Evolución de los contenidos de amonio del suelo (mg N kg^{-1} de suelo) en incubación aeróbica en laboratorio bajo diferentes condiciones de humedad	35
5	Emisión de óxido nitroso (N_2O) bajo condiciones de más y menos humedad en laboratorio	38
6	Relación entre el flujo de N_2O y la humedad del suelo	39
7	N mineral liberado por residuos vegetales en mezcla con suelo en incubación aeróbica	41
8	Producción de biomasa ($\text{g de MS planta}^{-1}$) y contenido de N (mg N planta^{-1}) de maíz cultivado durante 45 días en suelos provenientes de parcelas con diferentes tipos de sombra en San Pedro	45
9	Producción de biomasa ($\text{g de MS planta}^{-1}$) y contenido de N (mg N planta^{-1}) de maíz cultivado durante 45 días en suelos provenientes de parcelas con diferentes tipos de sombra en Santa Fe	46
10	Producción de biomasa ($\text{g de MS planta}^{-1}$) y contenido de N (mg N planta^{-1}) de maíz cultivado durante 45 días en suelos provenientes de parcelas con diferentes tipos de sombra en Verde Vigor	46

LISTA DE FOTOGRAFÍAS

FOTOGRAFÍA		PÁGINA
1	Ilustración del experimento sobre desnitrificación	22
2	Ilustración de toma de la muestra	22
3	Ilustración de la transferencia de la muestra en el tubo "vacutainer"	22

LISTA DE ANEXOS

ANEXO		PÁGINA
1	Resultados estadísticos de los tratamientos por sitio e interacciones para un diseño con efecto anidado y por especie en cada sitio sobre las características de los suelos en los tres sitios	58
2	Nitrógeno mineralizado acumulado y tazas de pérdidas durante la incubación aeróbica "in vitro" bajo los diferentes tratamientos en estado más húmedo	59
3	Nitrógeno mineralizado acumulado y tazas de pérdidas durante la incubación aeróbica "in vitro" bajo los diferentes tratamientos en estado menos húmedo	60
4	Porcentajes de pérdidas del contenido de N mineral inicial en los diferentes tratamientos bajo dos condiciones de humedad	61
5	Resultados estadísticos de la materia seca de maíz (g planta^{-1}) correspondiente a cada una de las especies (Sitio)	62

Gutiérrez, C M 2003. Disponibilidad y dinámica de nitrógeno en el suelo bajo especies maderables y leguminosas usadas como sombra en sistemas de café, en la subcuenca del Río Grande del General Tesis Mag Sc., CATIE, Turrialba, Costa Rica 62 p.

Palabras claves: *Coffea arabica*, N total, C orgánico, N mineral, *Erythrina poeppigiana*, *Eucalyptus deglupta*, *Terminalia* spp, desnitrificación, biomasa de *Zea mays* L.

RESUMEN

Se estudio la contribución de cinco especies de árboles de sombra sobre la disponibilidad y dinámica de nitrógeno en tres sistemas agroforestal con café. La evaluación se llevó a cabo al final de la estación seca en marzo del 2002 en la zona sur de Costa Rica. Las fincas privadas fueron seleccionadas con *Coffea arabica* L Cultivar Costa Rica 95 de 4 años en Verde Vigor, Caturra de 14 años en Santa Fe y Catuai rojo y amarillo (en mezcla) de 6 años en San Pedro. Las especies de sombra estudiadas fueron: las leguminosas *Inga* sp, *Erythrina poeppigiana*, Walp. (O F Cook) así como las maderables *Eucalyptus deglupta* Blume, *Terminalia ivorensis* A. Chev. y *Terminalia amazonia*. El estudio también incluye el sistema café a pleno sol

Se realizó la comparación de las características de la capa superficial 0-10 cm de los suelos Ultisol, por consiguiente se consideraron las físicas (textura, color, retención de agua), químicas (C orgánico, N total, C:N, pH, N mineral, Nmin) y biológicas (Índice de mineralización de N en condiciones anaeróbicas, Npm). Se incubaron los suelos en el laboratorio a 28 °C con dos niveles de humedad: a CC y a 80% de CC y se midió el Nmin durante 35 días. Residuos de los árboles (hojas de poda, hojarasca y raíces), fueron puestos en mezcla con suelo en incubación y fue medido el Nmin liberado. Al final se utilizó el maíz (*Zea mays* L.) como planta indicadora de la fertilidad del suelo mediante un experimento en invernadero.

Al fin de la estación seca las especies maderables presentaron menores contenidos de N mineral y $N-NO_3^-$ en el suelo que las parcelas de café en pleno sol o asociado con leguminosas. Las tasas de Npm en el suelo no mostraron diferencia significativa entre los tratamientos en estudio. Durante los primeros siete días de incubación aeróbica se observó el descenso brusco del contenido de $(NO_3^- + NH_4^+)$, el cual continuó hasta el fin de la incubación (35 días), las tasas de desaparición de N mineral a los siete días aumentaron con la humedad. Las pérdidas de Nmin estuvieron correlacionadas negativamente con el

contenido N_{min} inicial de los suelos ($r^2 = -0.99$; $P = 0.0001$) Para identificar la naturaleza de las pérdidas de N_{min} se llevó a cabo un experimento, para medir la emisión de óxido nitroso y se verificó una pérdida muy alta y rápida de N_{min} en forma de N_2O . Con la humedad más alta todo el N del suelo se perdió desde tres horas hasta 17 días.

Respecto a N_{min} liberado por los residuos vegetales de los árboles, después de un día de incubación, todos mostraron liberación de N a excepción de *E. deglupta* que inmovilizó el N. Las hojas de poró presentaron la mayor producción de N mineral en relación con la alta concentración de N (3.8%) y la hojarasca de *Inga* sp no mostró mejor liberación que la de *Terminalia* spp. En el caso de las raíces, las dos leguminosas se mostraron superiores a los tres maderables en la liberación de N.

Las leguminosas mostraron las mayores producciones de biomasa y extracción de N por parte del maíz. Las variables influenciadas por las especies (NO_3^- inicial, N_{pm} y calidad de los residuos: contenidos de N de las raíces y N liberado por las raíces) fueron relacionadas positivamente con la producción de biomasa y la extracción de N por la planta de maíz.

Gutiérrez, C. M. 2003. Effects of timber and service trees on Nitrogen availability and soil dynamics in coffee systems in the Rio Grande del General watershed. Mag. Sc. Thesis, CATIE, Turrialba, Costa Rica. 62 p.

Key words: *Coffea arabica* L., total N, organic C, mineral N, *Erythrina poeppigiana*, *Eucalyptus deglupta*, *Terminalia* spp., denitrification, *Zea mays* L. biomass

ABSTRACT

The contribution of five shade tree species on Nitrogen availability and dynamics was studied in coffee (*Coffea arabica* L.) agroforestry systems during the end of the 2002 dry season (March) on private farms in the south of Costa Rica: 7-yr-old var. Costa Rica 95 (Verde Vigor farm), 14-yr-old var. Caturra (Santa Fe farm) and a mix of vars. red and yellow Catuai (San Pedro farm). Treatments consisted of coffee under (leguminous) service tree shade (*Inga* sp. or *Erythrina poeppigiana* Walp. (O.F. Cook)), under timber tree shade (*Eucalyptus deglupta* Blume, *Terminalia ivorensis* A. Chev. or *T. amazonia*) or in full sun.

Physical (texture, color, water retention), chemical (organic C, total N, C:N, pH, mineral N (N_{min})) and biological (N mineralization index in anaerobic conditions (N_{pm})) Ultisol soil characteristics were compared for the 0 – 10 cm horizon. Soils with moisture levels at field capacity (FC) and 80% FC were laboratory incubated at 28 °C, measuring N_{min} during 35 days. Tree residues (pruned leaves, litter and roots) were incorporated in soil and incubated to measure N_{min} release. Afterwards, maize (*Zea mays* L.) plantlets were used as a soil fertility indicator in a greenhouse experiment.

At the end of the dry season timber species presented lower mineral N and N-NO₃ soil contents as compared to the coffee in full sun or associated with leguminous trees. N_{pm} soil rates did not differ significantly between treatments. During the first seven days of aerobic incubation, NO₃⁻ and NH₄⁺ contents declined notably, which continued until the end of incubation (day 35), and N mineral disappearance rates at day 7 increased with soil moisture. N_{min} losses correlated negatively with initial N_{min} soil contents ($r^2 = -0.99$; $P = 0.0001$). To identify the nature of N_{min} losses, an experiment was conducted to measure Nitric Oxide emission. A very high and rapid N_{min} loss was observed in the form of N₂O. With higher moisture rates, soil N was lost from three hours until day 17.

Regarding Nmin release by vegetative tree residues; after one day of incubation, all treatments showed N release, except the one with *E. deglupta* which immobilized N. *Erythrina poeppigiana* leaves presented the highest mineral N production in relation with the high N concentration (3.8%) and *Inga* sp litter did not present a better N release than *Terminalia* spp. With regard to the roots, N release under the two leguminous species was higher than under the three timber species.

Biomass production and N extraction by the maize plantlets were higher under the leguminous species. The variables influenced by the species (initial NO_3^- , Npm and residue quality: N contents of the roots and N release by the roots) related positively with biomass production and N extraction by the maize plantlets.

1. - INTRODUCCIÓN

1.1. - El problema

En las plantaciones de café (*Coffea arabica* L) se ha venido impulsado la introducción de árboles maderables de valor comercial y de rápido crecimiento, tales como *Eucalyptus deglupta* Blume y *Cordia alliodora*, (Morales y Beer, 1987; Tavares *et al.*, 1999), sustituyendo a otras especies de árboles de sombra tradicionales como *Erythrina poeppigiana* Walp. (O. F. Cook), *Inga* spp. Y *Gliricidia sepium*, o estableciéndose en plantaciones mixtas entre las especies mencionadas (Sánchez, 1994)

Un diagnóstico realizado por Tavares *et al.*, (1999) con productores de café de la zona sur de Costa Rica (Pérez Zeledón), sobre sus preferencias para la diversificación de sus plantaciones mostró mayor frecuencia de uso de las especies *Eucalyptus deglupta*; *Terminalia ivorensis* A. Chev y *Terminalia amazonia*, establecidas mediante plantaciones y especies nativas como *Aspidosperma magalocarpon*, *Lafoensia puniceifolia* y *Ocotea tonduzii*, establecidas por regeneración natural. Sin embargo Mesen 2002 (ICAFE) en comunicación personal indica que el 80% de los sistemas con café en la zona de Pérez Zeledón se encuentran todavía con *Erythrina* spp e *Inga* spp. Palm y Sánchez (1990) reportan que estas especies de árboles leguminosos (*Erythrina* spp e *Inga* spp), junto a *Cajanus cajan* son comúnmente encontrados en sistemas agroforestales en el trópico húmedo

Las ventajas y desventajas de la sombra en sistemas de café fueron resumidas por Vaast (2001) y Vaast y Harmand (2002) de la forma siguiente: la contribución de los árboles en el sistema va desde los beneficios económicos directos al productor, tales como la disminución de costos (manejo), ingresos adicionales y acceso a nuevos mercados, según la especie de sombra seleccionada. Una ventaja de los árboles de sombra es proporcionar mejores condiciones micrometeorológicas a través de una amortiguación de las temperaturas externa, mejorar la disponibilidad de humedad del aire y del suelo y la reducción en la velocidad de los vientos; además se mejora la fisiología, calidad, tolerancia a algunas plagas y a enfermedades del café. Otra función principal de los árboles es el mantenimiento de la fertilidad del suelo a través del reciclaje de nutrientes, mantenimiento de la materia orgánica del suelo por medio de la producción y descomposición de la hojarasca y de los residuos de la poda. También los árboles leguminosos pueden fijar nitrógeno biológicamente hasta más de la mitad del necesario para el desarrollo y la producción de los cafetales, aunque, esto puede ser considerado como un paradigma tal como lo expresan Palm (1995) y Handayanto *et al.*, (1995).

Además de controlar escorrentía y erosión (por hojarasca y residuos), disminuye las pérdidas de nutrientes y de la contaminación de acuíferos. Entre otros beneficios ambientales está la disminución de la presión del aprovechamiento de bosque, aumento en el secuestro de carbono y mantenimiento de la biodiversidad. Sin embargo los árboles de sombra pueden competir con la planta de café por los recursos necesarios para el crecimiento y la producción. Además, el costo que representa el manejo de la sombra, puede impedir la utilización de un dosel de sombra adecuado y traer como consecuencia un aumento de la incidencia de algunas plagas y enfermedades. En los sistemas mixtos de plantaciones de café (*C. arabica*) y cacao (*Theobroma cacao*) que incluyen a los árboles como piso superior, al interactuar con el ambiente influyen sobre las características del sitio, a través del ciclaje de nutrientes, los cuales son proveedores de nutrientes desde la hojarasca, podas periódicas y sombra para el piso bajo. Estos como especie de sombra en los agroecosistemas contribuyen generalmente entre el 50 y 70% del nitrógeno reciclado de los árboles de cultivo, especialmente cuando son manejados bajo podas intensivas de 2 a 3 veces por año (Montagnini y Sancho, 1993).

En agroecosistemas de café con sombra tienen una importante contribución los árboles leguminosos por su fijación simbiótica de nitrógeno, la que oscila según autores entre 1 - 60 kg N ha⁻¹ año⁻¹ (Bornemisza, 1982; Beer, 1988). Al respecto, Fassbender (1993) menciona que estas cantidades de N fijadas en el proceso simbiótico son muy discrepantes, ya que se han reportado valores entre 20 y 1000 kg N ha⁻¹ año⁻¹ fijadas en un ciclo de producción; Sin embargo, los valores mayores de 100 kg N ha⁻¹ año⁻¹ no están debidamente sustentados.

Erythrina poeppigiana también puede aportar al sistema 20000 kg MS ha⁻¹ año⁻¹ por medio de la práctica de podas (Szott *et al.*, 1991). La contribución de maderables como aporte de hojarasca de *Eucalyptus* sp. reportada están entre 3400 - 4600 kg Ms ha⁻¹ año⁻¹ (Singh *et al.*, 1989; George y Varghese, 1990).

El Nitrógeno es el elemento mayormente limitante para la productividad de los agrosistemas de café (Carvajal, 1984), y los árboles de sombra desde sus prácticas de manejo, como régimen de podas e intensidad de fertilización pueden tener efecto sobre la disponibilidad de N en el suelo. Respecto a estas especies leñosas, algunas pueden ser muy competitivas con el café por el uso del nitrógeno y otros nutrientes, los que podrían mejorar la disponibilidad de este elemento en el suelo por medio de la fijación atmosférica y el ciclaje.

Las tasas de mineralización del nitrógeno orgánico del suelo pueden diferir entre agroecosistemas, esto puede ser importante como índice de disponibilidad de nitrógeno para las plantas, además las prácticas de manejo en estos sistemas influyen sobre temperatura del suelo, potencial de agua, cantidad y calidad del sustrato y últimamente la mineralización de la materia orgánica del suelo (MOS) (Douglas y Magdoff, 1991; Babbar y Zak, 1995)

Para la identificación de criterios de selección de árboles para cada sistema agroforestal, Handayanto *et al.* (1995), sugirieron considerar las tasas y las cantidades de nitrógeno mineralizado para mayor disponibilidad del nitrógeno para los cultivos (Palm y Sánchez, 1990).

1.2. - La importancia

Hay que destacar la importancia de la producción de los residuos vegetales en el ciclo del nitrógeno lo que dependen del tipo de especies involucradas en dichos sistemas, de su manejo, principalmente podas (Fassbender, 1993) Este mismo autor evidencia la influencia que tiene las especies utilizadas como sombra con su aporte de residuos y acumulación de nitrógeno dentro del sistema, como el poró (*Erythrina spp.*) que acumuló $3.94 \text{ kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ de nitrógeno en las hojas, mientras que en laurel (*Cordia spp.*) acumuló un $2.16 \text{ kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ en las hojas. Las hojas del poró son un material que es fácilmente mineralizable por su alto contenido de nitrógeno (Fassbender, 1993)

Los procesos de transferencia del nitrógeno dentro del agroecosistema se basan en la producción de residuos y su descomposición (fragmentación, mineralización, y humificación) y el paso del nitrógeno con el agua a través del mismo (Fassbender, 1993) Este investigador menciona resultados provenientes del experimento central del CATIE sobre el contenido de nitrógeno aportados por los residuos naturales (hojarasca de café y poro): para el caso de sistema café - laurel $114.2 \text{ kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$, mientras que el sistema café - poró aportó $174.7 \text{ kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$; sin embargo, cuando en este último sistema se da el manejo de poda del poró, los aportes son mayores, hasta $286.7 \text{ kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$, debido a que los residuos representan el material verde con más concentración de nitrógeno que la hojarasca

Montagnini *et al.* (1999) reportaron que los nutrientes, productos de la mineralización, pueden llegar a la solución del suelo y ser lixiviados o retornar a las plantas por la vía de absorción de las raíces. Poco se conoce al respecto, sobre la tasa de mineralización del nitrógeno orgánico del suelo y su subsecuente transformación (Babbar y Zak, 1993), lo que tiene influencia directamente sobre la disponibilidad de nitrógeno para la planta de café. Por consiguiente, la importancia de estudios de mineralización de la

materia orgánica y de la dinámica de nutrientes es obvia, ya que a través del balance exacto de las reservas y transferencias de los elementos nutritivos en los agroecosistemas se pueden desarrollar técnicas de mejoramiento y optimización para su producción. Montagnini *et al.*, (1999) consideran que los datos de mineralización de nitrógeno bajo especies arbóreas frecuentemente no se hallan disponibles, ya que su estimación requiere procedimientos cuidadosos de laboratorio o de muestreo de campo

1.3.- Objetivos

1.3.1. - Objetivo general

Evaluar la contribución de las especies maderables y leguminosas sobre la disponibilidad del nitrógeno en el suelo en sistemas agroforestal con café en la subcuenca del Río Grande del General, Costa Rica

1.3.2. - Objetivos específicos

- Estimar el nitrógeno potencialmente mineralizable y el efecto sobre la nitrificación en suelos bajo diferentes especies de sombra, en sistemas agroforestales en asocio con café, a través de incubación en el laboratorio
- Identificar los componentes del sistema (hojarascas, raíces) que influyen sobre la disponibilidad de nitrógeno bajo estos sistemas agroforestales
- Estimar la producción de maíz en condiciones de invernadero, como especie indicadora de la fertilidad del suelo

1.4. - Hipótesis

- Los árboles leguminosos contribuyen significativamente al aumento de la mineralización del nitrógeno del suelo en sistema agroforestales con café
- Las especies maderables se diferencian por su efecto sobre la mineralización del nitrógeno del suelo.

2.- REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. - Formas del Nitrógeno

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 (rocas, atmósfera); es decir, comprende los procesos de absorción, acumulación, translocación y redistribución interna de elementos nutritivos en las plantas. También comprende los procesos de intercambio del nitrógeno con la atmósfera (ganancia y pérdidas) y el suelo (residuos vegetales y su descomposición, meteorización, escorrentía y lixiviación) (Fassbender, 1993)

En la naturaleza, el N se encuentra en la litosfera en un 98 % y el restante 2 % está distribuido entre la atmósfera, la hidrosfera y la biosfera. En la atmósfera existen los mayores contenidos del elemento bajo diversas formas gaseosas (N_2 , NO, NO_2), la hidrosfera, la biosfera y en los suelos solamente se encuentra en un 0.00014 % bajo la forma NH_4^+ y NO_3^- (Rivero, 1999)

El N orgánico representa entre el 85-95% del N total. Su naturaleza química es variada y poco estudiada, aunque en su mayoría tiene carácter proteico y constituye la reserva real del mismo, que es cedido lentamente a los cultivos. El contenido de N-inorgánico oscila entre 5 y 15 % del total y se presenta generalmente en las formas de óxido nitroso (N_2O), óxido nítrico (NO), dióxido de nitrógeno (NO_2), amoníaco (NH_3), amonio (NH_4^+), nitrito (NO_2^-) y nitrato (NO_3^-). El N-atmosférico, existe en forma elemental libre (N_2) y en cualquiera de sus otras formas gaseosas (N_2O , NO, NO_2 , NH_3) y también posiblemente pueden ser encontrados en forma orgánica adherido a las partículas de polvo. Aunque el N de la atmósfera representa un 2 % del N total sobre la tierra, éste constituye una fuente importante de N-orgánico para el suelo a través de los procesos de fijación biológica. Así también a través de procesos de fijación industrial, siendo esta la fuente originaria de los fertilizantes nitrogenados y la presencia de diferentes mecanismos atmosféricos como son las lluvias o las descargas eléctricas (Bertsch, 1998; Rivero, 1999)

2.2. - Proceso de mineralización

La mayor parte 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: Aminización o sea, la transformación de proteínas en aminas, Amonificación es el paso de aminas a amonio; estos primeros procesos por lo general se conocen como amonificación, es decir, que el proceso de mineralización 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, 1998).

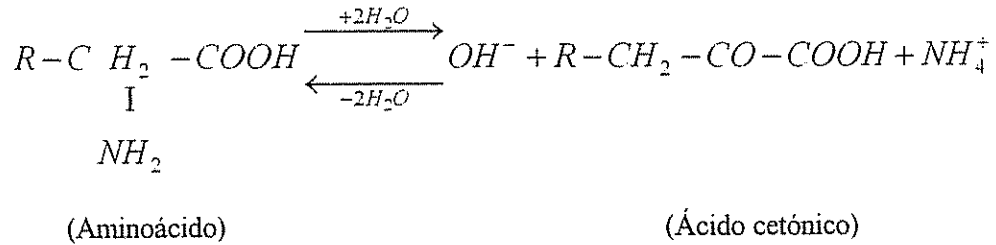
2.2.1. - Aminización

En la primera etapa llamada de aminización, las enzimas proteolíticas actúan sobre las macromoléculas de las proteínas, los ácidos nucleicos y otros compuestos nitrogenados hasta descomponerlas en aminoácidos. Entre las bacterias aeróbicas que participan, se encuentra: *Bacillus* y *Pseudomonas* y entre las anaeróbicas está la *Clostridium*; también participan en este proceso, los hongos heterótrofos.

Los aminoácidos resultantes pueden ser metabolizados por los microorganismos (inmovilización), adsorbidos por arcillas, formando complejos organominerales, incorporados en la fracción del humus, utilizados por las plantas ó mineralizados al extremo hasta transformarse en amonio por acción de otra serie de microorganismos (Bertsch, 1998).

2.2.2. - Amonificación

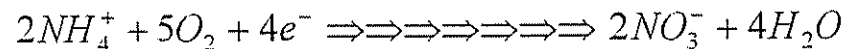
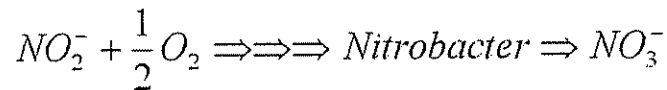
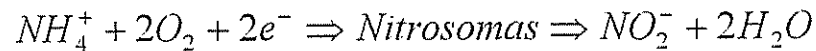
La amonificación de los aminoácidos se produce bioquímicamente a través de los procesos de desaminación y descarboxilación que conducen a la formación de amonio, que ya dentro de la solución del suelo pasa a comportarse como un catión corriente (NH_4^+). El amonio resultante de esta etapa puede ser absorbidos por las plantas o por la materia orgánica; fijado por los minerales; inmovilizado por microorganismos; lixiviado a través del suelo y oxidado hasta el nivel de nitratos (nitrificación) (Fassbender y Bornemisza, 1987; Bertsch, 1998). El amonio también puede ser volatilizado en forma de gas de amoníaco (NH_3).



2.2.3. - Nitrificación

Es la formación biológica del nitrato a partir de las sustancias que contienen N reducido. Cuando el ión amonio (NH_4^+), en condiciones aeróbicas es oxidado al ión nitrato (NO_3^-) se está en el proceso de nitrificación, el cual tiene como paso intermedio la producción de ión nitrito (NO_2^-). En esta etapa el proceso se da es la intervención de microorganismos autótrofos, es obligatorio y exclusivamente aeróbico

La primera reacción de transformación intermedia a nitritos la realizan principalmente bacterias Nitrosomas y luego intervienen las Nitrobacter. Ambas reacciones tienen lugar al mismo tiempo



Las condiciones óptimas para la nitrificación son temperaturas alrededor de 25 a 35 °C, pH ligeramente ácido y condiciones intermedias de humedad (Solórzano, 1997; Bertsch, 1998 y Rivero, 1999)

El nitrato resultante de esta etapa puede ser: absorbido por las plantas, inmovilizado por microorganismos, lixiviado a través del suelo, fijado por el complejo arcillo-humico cuando presenta cargas positivas y liberado hacia la atmósfera en forma gaseosa cuando ocurre la desnitrificación

2.2.4. - Factores que influyen sobre la mineralización y la nitrificación del Nitrógeno del suelo

Bertsch (1998) menciona que la mineralización del nitrógeno se estima entre el 1-2% del N total de los compuestos nitrogenados, pero pueden ser más alto, Harmand *et al.*, (2002), reportaron en algunos casos hasta más del 10% del N total de mineralización en suelos arenosos Bertsch (1998) hace mención que los factores que afectan a esto proceso de mineralización es: la temperatura, humedad, aireación, mineralogía de arcilla, pH, adición de materiales orgánicos, calidad de la materia orgánica (taninos, relación C : N), y manejo agronómico La temperatura pocas veces resulta ser limitante en las zonas tropicales y tal vez el factor dominante que limita y afecta las tasas de mineralización del N es el contenido de humedad en el suelo La mineralización se paraliza en estado seco y bajo condiciones de inundaciones se detiene en la etapa de amonificación Altos contenidos de arcilla disminuyen el proceso de mineralización, debido a que son capaces de retener altas cantidades de carbono por la formación de complejos organominerales

Otro factor que afecta la nitrificación del nitrógeno de los suelos es la acidez Solórzano, (1997), sugiere que a $\text{pH} < 5$, pobre en aireación puede darse la acumulación de N amoniacal (NH_4^+), el cual provoca un efecto tóxico a las plantas cultivadas al absorber y acumular en sus tejidos excesos de amonio reduciendo el rendimiento

La actividad de los microorganismos depende de factores como el pH, aireación del suelo y calidad de materia orgánica (Robertson *et al.* 1982) Los microorganismos presente necesitan nitrógeno para crecer Debido a esto una relación C :N mayor de 25 conduce a una lenta mineralización o bien a una inmovilización del N Rivero (1999) considera que la velocidad de la mineralización depende más de la calidad que de la cantidad de los residuos orgánicos

Las especies de árboles pueden influir sobre la forma del N mineral en el suelo (NH_4^+ , NO_3^-). Comparando tipos de bosque, Li *et al.*, (2001) obtuvieron que la forma dominante del nitrógeno mineral del suelo está ligada más al tipo de plantaciones forestales subtropical encontradas al sur este de China, que al valor del pH del suelo. Los valores del pH del suelo fueron para todos los tipos de bosque de 4.5. Sin embargo, el contenido de nitrato del suelo fue alto (24.47 a 26.08 mg kg^{-1} suelo) para las especies de leguminosas del genero *Acacia* y bajo para las especies no leguminosas forestales, como *Pinus elliotii* (4.19), *E. citriodera* (6.47) y *Schima superba* (4.24) mg kg^{-1} suelo.

En sistemas de café con sombra Mogollón *et al.* (1997), mostraron el efecto positivo del árbol *Inga villosissima* sobre el nitrógeno potencialmente disponible (Npd). Bajo café-*Inga* (SBI) obtuvieron en suelos con pH moderadamente ácidos, un valor de 141 kg N ha⁻¹ lo que es más alto que el valor de 85.1 kg N ha⁻¹ encontrado bajo café-cítricos (SBC). La contribución por parte de la leguminosa fue debida probablemente al aporte de N por fijación biológica, caída de hojarasca y el aporte de raíces.

Comparando sistemas de café en pleno sol con sistemas de café bajo sombra de poró, en suelos con pH bajo a medio (4.7-5.1-6) del Valle Central de Costa Rica, Babbar y Zak (1993) encontraron que la mineralización y la nitrificación neta del N del suelo fueron más altas bajo sombra (14.8 g N m⁻² año⁻¹) que en plantaciones de café a pleno sol (11.1 g N m⁻² año⁻¹). El nitrógeno estaba en la forma NO₃⁻ lo que significa que no hubo inhibidores de la nitrificación.

Solórzano (1997), menciona que existen inhibidores de la nitrificación, los cuales suprimen las bacterias que oxidan el amonio a nitrito lo que ocurre en la primera etapa de la nitrificación. También muchos pesticidas y fumigantes de suelo son potenciales inhibidores de la nitrificación (Munévar, 1983).

2.3. - Inmovilización

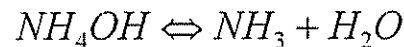
En oposición a la mineralización está la inmovilización, que es el proceso por el cual los microorganismos del suelo incorporan a su protoplasma el nitrógeno mineral que es suministrado al suelo a manera de fertilizantes o como productos de la mineralización que ocurrió anteriormente. El proceso es altamente favorecido por la presencia de materiales con elevados contenidos de carbono como fuente energética, es decir que si la concentración de compuestos nitrógenados en el material orgánico no es suficiente para las necesidades de los microorganismos durante la descomposición, probablemente induzcan a inmovilización. Este proceso ocurre con valores de la relación C : N mayores de 30 en residuos aplicados (Solórzano, 1997; Bertsch, 1998; Corey, 1990; Rivero, 1999).

2.4. - Lixiviación

Es una vía de pérdida importante del N del suelo, ocurre en forma de NO_3^- y NH_4^+ , los cuales se presentan en la solución del suelo, la que a su vez percola por gravedad hacia las partes más profundas del perfil del suelo (Fassbender y Bornemisza 1987). Los nitratos son los que se pierden mayormente por lavado y en suelos arenosos el NH_4^+ puede también perderse por esta vía. Estas pérdidas por lixiviación están determinadas por la cantidad e intensidad de las lluvias, las condiciones de la superficie del suelo que permita la mayor o menor infiltración, la textura y estructura del suelo (permeabilidad del perfil). También el potencial de fijación de NO_3^- en el suelo puede limitar el proceso de lixiviación (Vargas *et al.* 1994). También puede ocurrir cuando el aporte de nutrientes en el suelo excede la demanda de nutrientes por la planta. Los nutrientes más afectados por lixiviación son nitratos, potasio, calcio y magnesio (Cahn *et al.*, 1992).

2.5. - Volatilización

Corresponden a las pérdidas de N inorgánico, principalmente como 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).



Las pérdidas por emisión de gas pueden depender del suelo y de factores climáticos. Con valores de pH mayores de 7, los iones NH_4^+ pueden convertirse en NH_3 (gas amoníaco) el cual se pierde en la atmósfera si el suelo está seco (Bertsch, 1998). Cuando se aplica fertilizante químico especialmente urea sobre el suelo puede ocurrir este fenómeno de volatilización, estas pérdidas están entre el 5 y 20%, aunque se pueden dar pérdidas de hasta el 50% (Bertsch, 1998). Costa *et al.* (1990) mencionan la importancia sobre esta vía de pérdidas, las cuales pueden ser muy dependientes de las prácticas de manejo, dado que la volatilización solamente ocurre cuando las podas están en la superficie del suelo.

2.6. - Desnitrificación

Mientras la nitrificación requiere condiciones de aerobiosis la desnitrificación se produce en aerobiosis. Es un proceso biológico realizado por muchos organismos heterótrofos como: *Bacillus denitrificans*, *Vibrio denitrificans*, *Thiobacillus denitrificans* que son bacterias anaeróbicas. Este proceso ocurre cuando el O_2 es limitante y en presencia de compuestos orgánicos no nitrogenados como carbohidratos,

celulosa y sales de ácidos grasos volátiles que son oxidados por el oxígeno liberado por los nitratos proveyendo la energía necesaria para la reacción

Las condiciones edafológicas que favorecen la desnitrificación son: alta humedad (más del 60% de saturación), mal drenaje, temperaturas superiores a 25 °C y suelos con tendencia a reacción neutra, ya que la actividad de estas bacterias desnitrificantes es muy restringida a pH < 5, suficiente nitratos y alto contenido de carbono orgánico. En las reacciones de desnitrificación hay que considerar los siguientes pasos intermedios (Fassbender y Bornemisza, 1987; Barton, *et al* , 1999; Rivero, 1999)

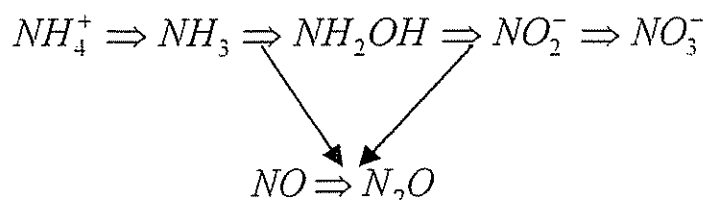
La primera etapa de la desnitrificación es la reducción de nitrato (NO_3^-) a óxido nítrico (NO) y óxido nitroso (N_2O) que es un gas de alto efecto invernadero. Ocurre durante la reacción siguiente:

Reacción de Desnitrificación:



La última etapa de la desnitrificación es la producción de N_2 , que ocurre cuando el nivel de humedad del suelo corresponde a más de 80% de rellenos de los poros (Davidson, 1991). También la emisión de óxido nitroso puede ocurrir durante la nitrificación según la siguiente reacción:

Reacción de nitrificación:



La fuente más importante de pérdidas del N del suelo como productos gaseosos es la desnitrificación (Russel, 1976). Bosweel, *et al* , (1985) señalan que estas pérdidas oscilan entre 0-70%, pero es más común encontrar entre 10 a 30% del nitrógeno aplicados en suelos bien drenados.

2.7. - Métodos para estimar la mineralización del nitrógeno en el suelo

2.7.1. - Incubación aeróbica *in situ*

Teóricamente los métodos de incubación de campo (*in situ*) son los mejores estimadores de la mineralización del nitrógeno (Anderson e Ingram, 1993) debido a que se encuentran en condiciones reales del campo como temperatura y humedad

En este método se emplean tubos de PVC no perforados, en donde el contenido de la humedad dentro de la muestra cambia durante el periodo de incubación, debido al movimiento del agua por capilaridad (Knoepp y Swank, 1995) En el campo, el suelo puede incubarse en intervalos de quince días o un mes (Adams y Attiwill, 1986)

2.7.2. - Métodos de incubación en laboratorio

Anderson e Ingram (1993) indican que el proceso de mineralización del nitrógeno se puede realizar bajo incubación en el laboratorio ("*in vitro*") el cual es un método alternativo que puede utilizarse para cuantificar también la mineralización neta. Los métodos de laboratorio comprenden la incubación bajo condiciones aeróbicas ó anaeróbicas

2.7.2.1. - Incubación aeróbica en el laboratorio

Los métodos aeróbicos son relativamente simples, de esta manera, muchas réplicas pueden ser efectuadas. El método presentado por Anderson e Ingram (1993) es el siguiente: la incubación aeróbica utiliza muestras compuestas de suelo, con un mínimo de 10 muestras / ha, donde es recomendable que las muestras sean incubadas por separado. La temperatura de incubación oscila entre 24 a 28 °C por 14 días; el peso de la muestra debe ser chequeado periódicamente y se realiza la corrección por pérdidas de agua. Estos mismos autores señalan que la mineralización y nitrificación neta se calcula como la diferencia de contenido en N mineral entre dos periodos de tiempo (tiempo 1 - tiempo 0) y los resultados son expresados como $\mu\text{g N/g}$ (peso seco suelo)/14 días.

La humedad de la muestra compuesta de suelo proveniente del campo puede ser llevada 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 (Matson y Vitousek, 1981). Hay también posibilidad de hacer incubación de suelo a la humedad del campo para que las condiciones sean más reales

Linden *et al.*, (1993) mencionan que en sus análisis de incubación aeróbica, las muestras de suelo fueron secadas al aire e incubadas en un cilindro de vidrio cubierto con polietileno transparente y semipermeable para permitir el intercambio gaseoso. La temperatura de incubación fue de 30 °C y un periodo de 14 días.

2.7.2.2.- Incubación anaeróbica en el laboratorio

El método anaeróbico es aceptable para caracterizar un sitio y en consecuencia para comparar los sitios. La producción potencial de N mineralizado bajo condiciones anaeróbicas se llama índice de N mineralizado en anaerobiosis. Estas condiciones impiden la oxidación de NH_4^+ resultando en un aumento de concentración NH_4^+ lo cual es entonces analizado. El estándar a seguir es 40 °C por 7 días de incubación, la tasa de N mineralizado anaerobicamente se expresa en $\mu\text{g N/g suelo /día}$ que es igual a: $(\text{tiempo 1}) [\text{N} - \text{NH}_4^+] - (\text{tiempo 0})$ entre 7 (Anderson e Ingram, 1993).

3- MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. - Localización y condiciones del área de estudio

El estudio se concibió a partir de suelos provenientes de diferentes sistemas agroforestales con café en la Subcuenca del Río Grande del General, situada en el Cantón de Pérez Zeledón perteneciente a la Provincia de San José, Costa Rica (Figura 1) Las localidades presentan un régimen de precipitación de 2736 mm año⁻¹ (C.A. Santa Fe) con una estación seca de cuatro meses (diciembre a marzo) y temperaturas promedio entre 23.5 y 25.7 °C, una humedad relativa de 45-85 % y a una altitud de 300 – a 1000 m s n m (Tavares *et al* 1999)

De acuerdo a la clasificación de Copen, el clima es de tipo tropical lluvioso (Amw), y conforme a Holdridge (1967), a la zona le corresponde una clasificación de bosque tropical montano bajo.

Los suelos se clasifican como Typic Haplohumult y presentan las siguientes características: son suelos rojos, ácidos, muy meteorizados, de textura arcillosa bien estructurado y con buenas condiciones físicas, estos suelos rojos ocupan las partes más alta de la cuenca y las posiciones más altas de la pendiente (Bertsch, 1988; Alvarado, 2001)

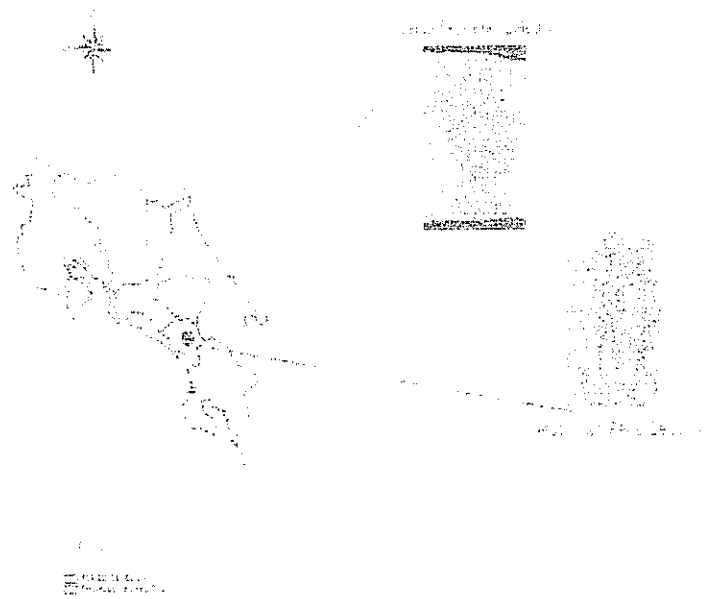


Figura 1 - Localización del área de estudio (Renderos, 2001)

Para la realización de esta investigación se definieron tres sitios: El sitio 1: Verde Vigor, sitio 2: Santa Fe y sitio 3: San Pedro (Pérez Zeledón). El sitio 1 y 3 están localizados, en el distrito de San Pedro, 30 km con respecto al sur este de la ciudad de San Isidro del General y el sitio 2 ubicado en el distrito El Cajón a 17 km al sur de la misma ciudad sobre la carretera interamericana. Las parcelas estudiadas de Verde Vigor y San Pedro se ubican a una altitud de 600 m s n m y Santa Fe a 700 m s n m, se registran temperaturas promedio de 23 °C y 85 % de humedad Relativa (H.R.).

La Finca de Verde Vigor tiene un área productiva de 630 ha en las que producen principalmente café (*C. arabica* L.) bajo sombra de *Eucalyptus deglupta*. La topografía del terreno presenta pendientes entre 4 a 26%. La finca Santa Fe tiene un área de producción de 970 ha de café asociado con *Eucalyptus deglupta*. La pendiente del terreno varía de 0 a 30%. La plantación de San Pedro pertenece a COOPEAGRI R.L., la cual es una cooperativa que tiene una plantación comercial de café con sombra (21 ha), caña de azúcar (*Saccharum officinarum* L.) y también áreas forestales. Las parcelas en estudio se ubican a una altitud de 600 m s.n.m y la topografía del terreno tiene una pendiente entre 1.5 y 2%.

3.2. - Caracterización de los sistemas agroforestales en estudio

El presente estudio se condujo en sistemas de producción de *Coffea arabica* en asocio con árboles de cuatro años bajo este manejo en Verde Vigor, seis años en San Pedro y siete años en Santa Fe. Los árboles de sombra encontrados en el sistema fueron: *Inga* spp, *Erythrina poeppigiana* Walp. (O. F. Cook) (poró), *Eucalyptus deglupta* Blume; *Terminalia ivorensis* A. Chev. y *Terminalia amazonia*. Además fue estudiado el manejo de café sin árboles de sombra en Santa Fe y Verde Vigor (Cuadro 1).

Cuadro 1. Especies arbóreas establecidas en los tres sitios de la subcuenca del Río Grande del General, Cantón Pérez Zeledón 2002

Verde Vigor	Santa Fe	San Pedro
Especies arbóreas		
<i>Erythrina poeppigiana</i>		<i>Erythrina poeppigiana</i> <i>Inga</i> sp
<i>Eucalyptus deglupta</i>	<i>Eucalyptus deglupta</i>	<i>Eucalyptus deglupta</i>
<i>Terminalia ivorensis</i>		<i>Terminalia ivorensis</i>
		<i>Terminalia amazonia</i>
Otro tratamiento		
Café a pleno sol	Café a pleno sol	-----

Ensayo de Verde Vigor

El ensayo se estableció en la finca de Verde Vigor en 1998, por el CATIE en colaboración con ICAFE. Fue establecido un diseño experimental de cuatro tratamientos y cuatro bloques. El factor de estudio fue la especie de sombra: *Erythrina poeppigiana*, *E. deglupta*, *T. ivorensis* y un testigo sin árboles. Las parcelas miden 42 m x 48 m. Las distancias de siembra fueron 2 x 1 m para café, 6 x 6 m para las

maderables y 8 x 8 m para el árbol de servicio (poró). Las especies arbóreas fueron establecidas el mismo año que el café (1998). El muestreo de suelo, en este sitio se realizó en los bloques I, II y IV, los cuales se encontraban con el mismo manejo y la misma pendiente del terreno.

Ensayo Santa Fe

En la finca Santa Fe fue precisado un experimento con una parcela de *C. arabica* (2 x 1 m) asociado con *E. deglupta* (6 x 6 m) y otra a pleno sol. El tamaño de las parcelas contiguas fue de 0.5 ha cada una. El cultivo de café fue establecido en 1988 y posteriormente en 1995 se plantó la especie maderable. La densidad inicial de los árboles de *E. deglupta*, fue de 240 árboles ha⁻¹, posteriormente en el año 2000, se eliminó la mitad de los árboles para obtener una población de 120 árboles ha⁻¹. En las parcelas a pleno sol se dio igual manejo que en la parcela en donde están los árboles.

Ensayo San Pedro

Este ensayo fue establecido por ICAFE en una finca privada en San Pedro. Se establecieron cinco parcelas una a continuación de la otra, cada una con una especie de sombra y con dimensiones de 5000 m², las que tuvieron el mismo manejo. El café (2 x 1 m) fue establecido en 1996, al igual que los árboles. Las cuatro primeras parcelas correspondieron a las especies de sombra siguientes: *Inga* sp., *E. poeppigiana*, *T. ivorensis*, *T. amazonia*, cuya distribución de los árboles fue de 6 x 6 m. La quinta parcela con sombra de *E. deglupta* fue establecida con una distribución de los árboles de 12 x 12 m (después del raleo).

Aspectos de manejo agronómico y fitosanitario

Se recolectó información de las principales labores agrícolas para la atención del café y el manejo de las especies arbóreas como sombra, así también sobre insumos aplicados y la producción registrada. En los cuadros 2, 3 y 4 se resume toda la información recolectada.

Las aplicaciones de fertilizantes en los sitios de Verde Vigor y Santa Fe se realizaron en forma fraccionada a partir de las primeras lluvias fuertes. En 2001, en ambos sitios, la primera fertilización se dio entre abril - junio y la segunda aplicación entre julio - agosto.

La fórmula aplicada fue 18-3-15-6-0.4-7.3 (N-P₂O₅-K₂O-MgO-B-S). Hasta el año 2000 hubo aplicación de Nitramón a razón de 80 kg ha⁻¹ durante el mes de noviembre. En San Pedro las aplicaciones se realizaron dos veces al año. En el mes de junio, la fórmula aplicada fue 22-0-20 (N-P-k) y en el mes de noviembre Nitramón con 33% de N; 8% de Ca; 8% de MgO.

Cuadro 2. - Características del café en los diferentes sitios en estudio

Sitios	Variedad de café	Edad (años)	Plantas ha ⁻¹	Podas	Rendimiento café oro (kg ha ⁻¹)
Verde Vigor	Costa Rica 95	7	4500		725
Santa Fe	Caturra	14	6000	De 3 hileras 1 se	1440
San Pedro	Catuai Rojo Catuai Amarillo	6	5000	poda cada año	2040

Cuadro 3 - Características de manejo de las especies de sombra en los diferentes sitios en estudio

Manejo	Sitios		
	Verde Vigor	Santa Fe	San Pedro
Densidad de árboles ha ⁻¹	270 por <i>E. deglupta</i> y <i>T. ivorensis</i>	120 (después del raleo)	270 (<i>Terminalia</i> spp., <i>Inga</i> sp., <i>E. poeppigiana</i>) 70 por <i>E. deglupta</i> (después del raleo)
Poda	156 por <i>E. poeppigiana</i>		
		<ul style="list-style-type: none"> ▪ <i>E. poeppigiana</i> : descubre dos veces/año. ▪ <i>Inga</i> sp : poda parcial una vez /año ▪ <i>E. deglupta</i>: poda hasta 4 m de altura ▪ <i>Terminalia</i> spp: poda de mantenimiento y sanitaria. 	

En el sitio Verde Vigor el plan de control de plantas indeseables, desde julio del 2001 se ha hecho básicamente mecánico con el uso de machete, realizándose en los meses de mayo, agosto o septiembre. Con respecto a las plagas en los cafetales han evitado las aplicaciones de químicos. En Santa Fe las malezas fueron controladas a partir de septiembre del 2001 con machete, anteriormente practicaron el control con herbicidas. Se controlaron insectos como *Leucoptera coffeella* (minador) y enfermedades como: Ojo de gallo (*Mycena citricolor*); la roya (*Hemileia vastatrix*); y mal de hilacha (*Pellicularia koleroga*).

Las aplicaciones químicas hechas fueron dirigidas a ataques focalizados de éstos organismos. El manejo de malezas en la plantación San Pedro se realizó dos veces por año (abril a mayo) y antes de la colecta del café (septiembre). Las gramíneas (malezas) fueron controladas aplicando herbicidas como Roundup, Glifosato ó Rimazato a dosis de 3 - 2 litros en 400 litros de agua por cada hectárea. Para malezas de hoja ancha se asperjó una mezcla de Paraquat más Gardoprim a dosis de 3 litros. En el

aspecto fitosanitario no se presentó incidencia de plagas insectiles pero si se reportaron enfermedades como: mal de hilacha (*Pellicularia kolleroga*) y mal Rosado (*Corticium salmonicolor*)

Cuadro 4 Fertilización aplicada en el sistema agroforestal café asociado con árboles de sombra para el 2001 en las fincas Verde Vigor, Finca Santa Fé (Van Kantén, datos no publicados) y San Pedro (Coopeagri R.L., 2002)

Sitios	Nitrógeno	Potasio	Calcio	Magnesio	Boro	Zinc
Verde Vigor	112.5	77.8	850	22.5	2.5	-
Santa Fe	124	140	25.6	54	0.44	0.76
San Pedro	203	70	600	48	-	-

3.3.- Área de muestreo, selección de árboles y obtención de muestras de suelo

En Verde Vigor el área experimental estaba conformada por cuatro tratamientos (*E deglupta*, *E poeppigiana*, *T ivorensis* y café a pleno sol), los que se establecieron en cuatro bloques; sin embargo, las muestras de suelo fueron extraídas únicamente de 3 bloques (I, II y IV) debido a su buen estado de manejo. En cada parcela de cada bloque fueron fijados aleatoriamente cuatro árboles del centro de la misma. Por cada árbol, se extrajeron dos submuestras de la capa 0 -10 cm del suelo, localizadas a 1.5 metro a cada

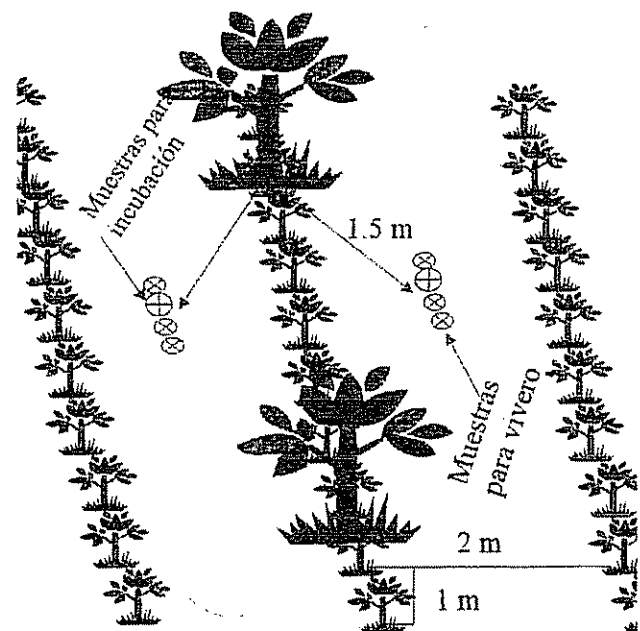


Figura 2 - Esquema representativo de la extracción de las submuestras de suelo por árbol

lado del árbol, entre dos hileras de café, en el centro de la calle (Figura 2). Las 8 submuestras se mezclaron para obtener una muestra compuesta por tratamiento y bloque (700 g), de igual forma se realizó el muestreo en la parcela a pleno sol. Posteriormente se removieron las piedras, raíces contenidas en el suelo, así como, se desmenuzaron los agregados. Finalmente el suelo se colocó en bolsas de polietileno que se pusieron en hieleras con el fin de conservar el estado del suelo en las

condiciones de campo hasta el momento de los experimentos. Simultáneamente en los puntos de muestreo definidos, se extrajeron muestras de suelo compuestas de 2 kg. las que se utilizaron para establecer el experimento de producción de maíz (*Zea mays*) en invernadero.

En la finca Santa Fe y San Pedro, cada parcela corresponde a una especie de árbol la cual fue dividida en tres subparcelas. En cada subparcela se aplicó el procedimiento de muestreo de suelo ya presentado por Verde Vigor.

3.4.- Análisis de los suelos

Las muestras de suelos y análisis foliar de los árboles de sombra y planta de maíz fueron analizadas en el Laboratorio de Suelos del Centro Agronómico Tropical de Enseñanza (CATIE) ubicado en el Cantón Turrialba, Costa Rica. Los análisis de laboratorio incluyeron las siguientes determinaciones:

- Se determinó el color de los suelos bajo estudio, partiendo de la comparación visual de una porción de suelo húmedos con la ayuda de la guía manual de Munsell Soil Color Charts 1971.
- Se hizo el análisis de textura por granulometría por el método de Bouyoucos modificado (Díaz y Hunter 1978; Forsythe, 1985).
- El Carbono orgánico fue analizado por el método de Walkley Black (Bornemiza *et al.*, 1979; Nelson y Sommers, 1996);
- El Nitrógeno total (N) fue determinado por el método de Semimicro Kjeldahl (Bremner, 1996);
- El pH del suelo se midió a partir de la muestra de 10 ml de suelo con 25 ml de agua, en una relación 1: 2.5 suelo / solución y fue leída la acidez con un medidor de pH;
- Se determinó un índice de mineralización en condiciones anaeróbicas de las muestras de suelo a 40 °C por 7 días, extraído con KCl 1N. Determinación colorimétrica del amonio (N-NH_4^+) en equipo ALLIANCE Integral Futura.

Índice de mineralización anaeróbica

El montaje de la incubación anaeróbica, fue con la finalidad de obtener un índice de la mineralización del N. Para este procedimiento el suelo fue incubado a una temperatura de 40 °C por 7 días y se determinó el amonio por el método ya mencionado. Los resultados se expresan como la tasa de mineralización de N anaeróbica en mgN kg^{-1} suelo día^{-1} que es igual a $(\text{tiempo 1} - \text{tiempo 0}) / (\text{tiempo de incubación}) \times (\text{N-NH}_4^+ - \text{NH}_4^+ - \text{N}) / 7$, de acuerdo a Anderson e Ingram (1993).

- El N mineral fue extraído por destilación y cuantificado a partir del método colorimétrico ($\text{N-NH}_4^+ + \text{N-NO}_3^-$) en equipo ALLIANCE Integral Futura

Protocolo de extracción del N mineral del suelo:

- 1.- De cada muestra de suelo, se pesaron 10 gramos con la ayuda de una balanza analítica que se colocaron en botellas de centrifugas de 250 ml de capacidad
- 2.- Simultáneamente, de cada muestra, se pesaron 10 gramos que se colocaron en latas. Luego, fueron secadas dichas muestras en el horno a 105 °C por 24 horas para determinar la humedad del suelo
- 3.- A cada botella de centrifuga con la muestra, se agrego 100 ml del reactivo KCl 2N, mediante el uso de un dispensador previamente calibrado. Inmediatamente se taparon las botellas con un tapón de hule para evitar la fuga de la solución.
- 4.- Fueron agitadas las muestras de suelo por una hora, mediante el uso de un agitador mecánico horizontal.
- 5.- La centrifugación de las muestras de suelo. Se realizó mediante el uso de centrifugas con cabezote para tubos de 250 ml por un periodo de cinco minutos a 3000 rpm.
- 6.- Se preparó una muestra de blanco que contuvo el reactivo menos la muestra de suelo, la cual fue agitada junto con las muestras.
- 7.- Finalmente, se filtraron las muestras utilizando papel filtro Whattman # 42 y se guardaron los extractos claros. Los extractos que no fueron analizados inmediatamente, se guardaron en el refrigerador (5 °C) hasta que llegó el momento adecuado para la determinación de los contenidos de amonio y nitrato.

Cuantificación de N mineral a partir del método colorimétrico

Para determinar (NH_4^+ y NO_3^-) a partir del extracto filtrado, se utilizó el método colorimétrico, utilizando el equipo Futura 2000. Una vez que se analizaron las muestras, se procedió al cálculo de las concentraciones de NH_4^+ y NO_3^- mediante los siguientes cálculos:

$$\text{N-NH}_4^+ \text{ (mg/kg)} = (\text{ppm}_m - \text{ppm}_{bl}) * 100 / (\text{peso muestra corregido base seca})$$

Donde: ppm_m: partes por millón de la muestra (mg/l de N-NH₄⁺)

ppm_{bl}: partes por millón del blanco (mg/l de N-NH₄⁺)

$$\text{N-NO}_3^- \text{ (mg/kg)} = (\text{ppm}_m - \text{ppm}_{bl}) * 100 / (\text{peso muestra corregido base seca})$$

Donde: ppm_m: partes por millón de la muestra (mg/l de N-NO₃⁻)

ppm_{bl}: partes por millón del blanco (mg/l de N-NO₃⁻)

3.5. - Experimento sobre mineralización aeróbica de Nitrógeno "in vitro"

Se procedió primeramente al tamizado de los suelos (4 mm), se extrajeron 60 g de suelo y se depositaron en envases elaborados de tubos de polietileno (PVC) con dimensiones de 40 mm de alto, 50 mm de diámetro interno y de fondo constituido por una tapa de PVC. Cada tratamiento fue replicado dos veces; la primer serie de muestras fue llevada a capacidad de campo (CC) y a la segunda a un 80% de su CC

La CC fue determinada previamente, utilizándose el siguiente procedimiento: se tomaron contenedores perforados en el fondo del envase y se colocó un papel filtro y 60 g de suelo dentro de cada uno. Seguidamente fue añadida agua destilada poco a poco hasta que escurra el agua libremente del papel filtro e inmediatamente se colocó los contenedores en una caja plástica que contenía arena tamizada a 2 mm y se les dejó por cinco horas, tapando la caja plástica. Al final del tiempo antes indicado, del contenedor no drenaba más agua, toda estaba retenida por el suelo. Los contenedores fueron sellados abajo con una cinta para cubrir las perforaciones y cubiertos con una película de plástico-transparente semipermeable, permitiendo el intercambio gaseoso. Finalmente las muestras fueron incubadas a una temperatura de 28 °C en la oscuridad. El peso de las muestras en incubación fue revisado cada semana para reajustar su humedad de acuerdo a la metodología de Anderson e Ingram (1993). Las extracciones del amonio y nitrato (NH_4^+ y NO_3^-) se realizaron a los 0, 7, 21 y 35 días.

3.6.- Experimento sobre desnitrificación

Debido a la mineralización y nitrificación negativa observada en la incubación aeróbica por inmovilización o desnitrificación, se llevó a cabo un experimento con la finalidad de medir la emisión de óxido nitroso (N_2O) que ocurrió durante el proceso de incubación aeróbica de los mismos suelos, hechos un muestreo en la estación seca.

Para esto fueron utilizadas botellas plásticas de 200 ml con tapas plásticas en el centro de las cuales le fueron adaptados unos septums. Fueron utilizados los mismos suelos que en la incubación aeróbica. Al frasco se le colocaron en su fondo 20 g de suelo de una muestra. Se ajustó la humedad a capacidad de campo para una serie de muestras y a 80 % de la CC para la otra. A continuación se procedió a cerrar muy bien el frasco con la película de plástico, después de 24 horas de la incubación se procedió a la medición de la emisión de N_2O durante 60 minutos, tal y como se muestra en la Foto 1.

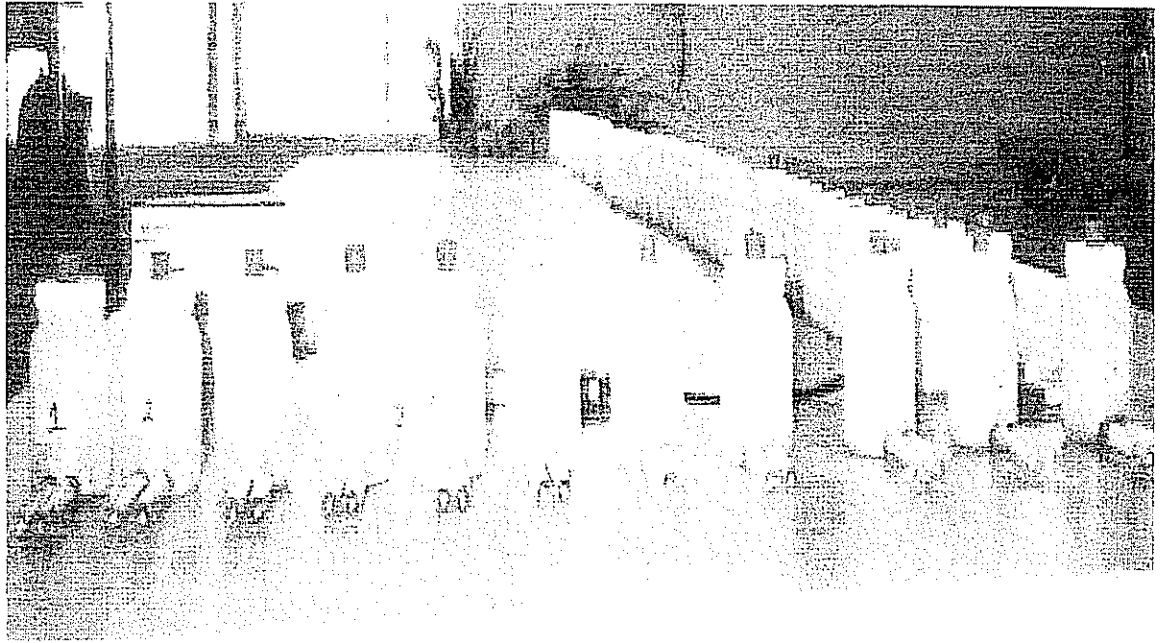


Foto 1 - Ilustración del experimento de desnitrificación

Después de este lapso de tiempo se tomó unos 20 ml de aire contenido dentro de cada botella cerrada y se transfirió el gas a dos tubos "vacuatañier" de 10 ml con una jeringa de 20 ml de capacidad. Al inicio de la incubación fue tomada una muestra del aire presente en el laboratorio. También se registró la información sobre temperatura ambiental, humedad relativa, volumen del aire ocupado por la botella y el tiempo exacto de inicio y cierre de esta (Foto 2 y 3)

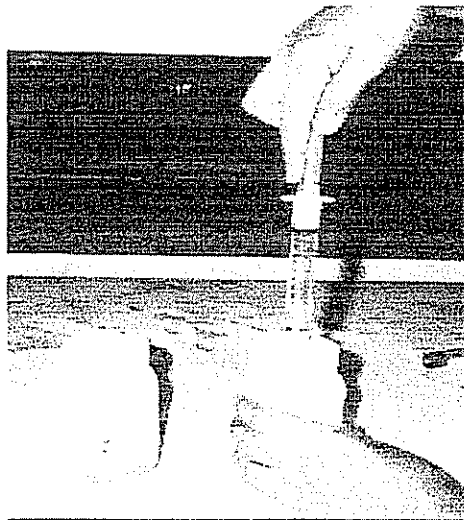


Foto 2 - Ilustración de toma de la muestra.

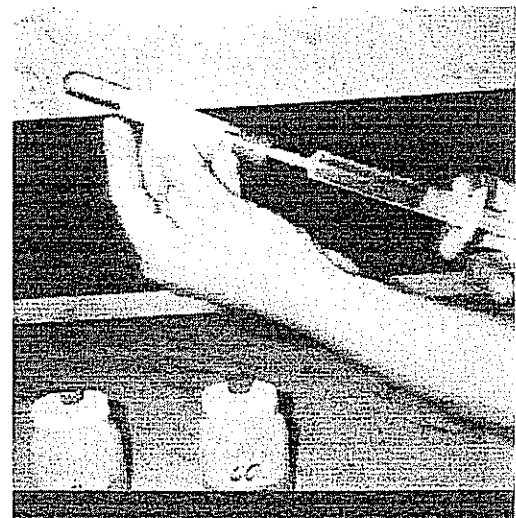


Foto 3. - Ilustración de la transferencia de la muestra al tubo "vacutainer"

Posteriormente el óxido nitroso fue determinado por cromatografía de gases en el laboratorio del Centro de Ecología e Hidrología (CEH) en Edimburgo, Escocia

3.7. - Liberación de N por diferentes residuos de árboles de sombra

3.7.1. -Recolección y análisis de hojarasca y raíces finas de árboles

En San Pedro se recolectó hojarasca, incluyendo las recién caídas de: *E. deglupta* Blume, *T. ivorensis* A. Chev y *T. amazonia*. En el caso de *E. poeppigiana* Walp (O F. Cook), las hojas verdes fueron tomadas directamente de los árboles, dado que ellas forman una gran parte de los residuos de poda. Posteriormente fueron removidas las raíces de tres árboles, extrayéndose con un palín. Las raíces de un diámetro < 2 mm fueron aisladas con un pie de rey. En la finca Repunta S. A a 0.5 km del sitio de San Pedro, fue recolectadas la hojarasca y raíces de *Inga* sp en una plantación asociado con café. Todo el material vegetal recolectado fue manejado según el mismo procedimiento antes descrito. El material fresco fue conservado en la cámara fría (5°C) durante la preparación del experimento siguiente.

Se determinaron las cantidades de nitrógeno total en el material recolectado (hojas y raíces), el cual fue inicialmente secado a 70 °C por 48 horas y luego molido por una malla de 0.25 mm para su posterior análisis químico por el método de digestión Semimicro Kjeldahl. La determinación de Nitrógeno se realizó en tres etapas: digestión de la muestra, destilación y valoración (Briceño y Pacheco, 1984; Jones y Case, 1990)

Protocolo de la digestión de la muestra

1. Primeramente se pesó 0.1 gramos de cada muestra seca y molida del material vegetal.
2. Cada muestra se colocó en el balón Kjeldahl, se adicionó una pastilla de digestión de 1.5 gramos de K_2SO_4 y 1 gota de la solución de Selenito de Sodio. Luego se adicionó 5 ml de H_2SO_4 concentrado y se dejó en reposo por una hora.
3. Se colocó el balón Kjeldahl en la plantilla, adicionándole 2 trocitos de zinc metálico y fue aumentada la temperatura paulatinamente hasta el máximo. Se dejó en ebullición hasta que la muestra se aclaró, aproximadamente 1 1/2 hora.
4. Cuando la digestión terminó, se apagó y se esperó que disminuyera la temperatura de la solución.
5. Ya enfriada la muestra se adicionó aproximadamente 30 ml de H_2O destilada, y se dejó enfriar de nuevo.

6. El mismo procedimiento fue aplicado al tratamiento blanco, el cual contiene todos los reactivos menos la muestra de los residuos vegetales
7. Para el patrón (blanco) se tomó una alícuota de 10 ml y se le aplicó el mismo procedimiento descrito anteriormente a cada muestra de material vegetal

Protocolo de la destilación

8. Se preparó un erlenmeyer con 20 ml de la solución de H_3BO_3 como indicador, colocándose en la salida del tubo del condensador
9. Se conectó el balón Kjeldahl al sistema de destilación y poco a poco muy cuidadosamente se adicionó NaOH por el embudo de adición, hasta que el medio fue básico, lo que se determinó por el color rosado en el balón, debido al cambio de pH básico en presencia de fenolftaleína
10. Se inició la destilación por cinco minutos o hasta que el destilado llegó a la marca de 75 ml del erlenmeyer. Se guardó el destilado para su posterior titulación.
11. Se titula el destilado con la solución de H_2SO_4 0.025N, hasta viraje del color verde al primer cambio a azul grisáceo.
12. El mismo procedimiento se aplica al blanco y al patrón.

Cálculos:

$$\% N: \{(ml_m - ml_{bl})\} * N_{H_2SO_4} * 0.014 * 100 \} \div (\text{peso muestra})$$

Donde:

ml_m = mililitros de H_2SO_4 consumidos por la muestra ml_{bl} = mililitros de H_2SO_4 consumidos por el blanco
 $N_{H_2SO_4}$ = normalidad exacta del H_2SO_4 0.014 = peso miliequivalente del nitrógeno

3.7.2. - Incubación de los residuos vegetales en mezcla con suelo

Para la preparación de la mezcla (suelo + residuo vegetal) se consideró una proporción de material vegetal de 2% equivalente a su peso seco. Tomando en cuenta la humedad de cada sustrato, se calcularon las cantidades de materia fresca de residuo vegetal a utilizar en mezcla con 60 g de suelo fresco (Cuadro 5). El suelo utilizado es un Inceptisol, tomado de una muestra compuesta de los primeros 10 cm del suelo proveniente de un cafetal manejado orgánicamente desde hace cuatro años de la finca experimental en el CATIE. La humedad gravimétrica del suelo fue 55 % al momento de tomar

la muestra. El suelo tenía un pH de 4 en agua; el contenido de carbono total fue de 3.07% y de nitrógeno total de 0.31%

Se estudiaron 10 tratamientos correspondientes a las especies en estudio (cinco de raíz y cinco de hojarasca) más un testigo, los cuales fueron replicados cuatro veces. La preparación de cada tratamiento consistió en introducir en una bolsa plástica las correspondientes porciones, agitándose hasta que estuvieron completamente mezcladas e inmediatamente se colocó en el incubador el contenedor con dicha mezcla

Para estimar la liberación de N por residuos de los componentes de los árboles (hojarasca y raíces), se midió el contenido de N mineral 24 horas y siete días después de estar en el incubador. La liberación del nitrógeno por los residuos se obtuvo por diferencias entre los valores de N acumulado en las mezclas suelos-residuos y en el suelo solo

Cuadro 5. Peso fresco de material vegetal (g) para 60 g de suelo fresco (equivalente en peso seco a una proporción de 2% de material vegetal)

Componentes	Especie				
	<i>E. deglupta</i>	<i>Inga</i> sp.	<i>E. poeppigiana</i>	<i>T. ivorensis</i>	<i>T. amazonia</i>
	Peso fresco (g)				
Hoja	1.25	0.92	2.24	1.34	1.27
Raíz	2.29	0.77	4.84	1.97	1.86

3.8. -Experimento de disponibilidad de Nitrógeno en invernadero

Se utilizaron muestras de 2 kg de suelo procedentes de cada ensayo: Verde Vigor (4 tratamientos), Santa Fe (2 tratamientos) y San Pedro (5 tratamientos). El suelo se depositó en macetas de 2 dm³, donde se estableció el maíz. Cada uno de los tratamientos se replicaron en cuatro macetas, obteniéndose la cuarta a partir de una mezcla de las tres muestras efectivamente obtenidas en los sitios en estudio

Se sembraron cuatro semillas de maíz por maceta, dejando dos plantas en cada una de ellas por medio del raleo realizado 10 días después de la germinación. Para compensar la deficiencia de fósforo en los suelos se aplicó semanalmente Triple Super fosfato a razón de 20 cc bomba⁻¹ de 18 litros de agua

Las plantas fueron cosechadas a los 45 ddg (días después de la germinación). Se pesaron separadamente parte aérea y parte radical que fue secada al horno a 60 °C hasta peso constante. Posteriormente se tomaron muestras representativas de la parte aérea y radical de la planta de maíz en cada tratamiento y se les determinó el contenido de N total.

3.9. - Análisis de los datos

3.9.1. -Descripción de los modelos estadísticos aplicados a los datos

Para el análisis estadístico de las variables respuestas obtenidas en los diferentes trabajos experimentales, fueron aplicados los modelos matemáticos, descritos a continuación:

Modelo 1. -Modelo de un diseño completamente al azar en arreglo factorial anidado (especies dentro de sitio) (DCA). (Montgomery, 1991)

$$Y_{ijk} = \mu + \tau_i + \alpha(\tau)_{ij} + \epsilon_{ijk} \quad \text{donde,}$$

Y_{ijk} = Variable respuesta	μ = Media general	τ_i = Efecto del i-ésimo sitio
$\alpha(\tau)_{ij}$ = Efecto del j-ésima especie dentro del i-ésimo sitio.		ϵ_{ijk} = Error experimental.

A las variables medidas se le procedió a aplicar un análisis de varianza con el modelo indicado arriba, para determinar el efecto de los sitios y de las especies arbóreas. Para conocer, el orden jerárquico o la mayor contribución de los tratamientos se utilizó posteriormente la prueba de rangos múltiples de Duncan's con un margen de error del 5%

Modelo 2.- Diseño de bloques completamente al azar con distribución unifactorial. (Montgomery, 1991)

$$Y_{ijk} = \mu + \tau_i + \beta_j + \epsilon_{ijk} \quad \text{donde,}$$

Y_{ijk} = Variable respuesta	μ = Media general	τ_i = Efecto del i-ésima especie
arbórea de sombra	β_j = Efecto del j-ésimo bloque	ϵ_{ijk} = Error experimental

Este modelo fue aplicado a los datos obtenidos con la finalidad de determinar el comportamiento estadístico de las especies dentro de los sitios de Verde Vigor y San Pedro

Modelo 3.- Prueba de Student (t).

Steel and Torrie (1988), señala que esta prueba es aplicable a muestras independientes para un par de tratamientos en donde la hipótesis nula de no diferencia, t se define como:

$$t = \frac{Y_1 - Y_2}{S_{Y_1 - Y_2}}$$

Si... Ho : $\mu_A = \mu_B$: Hipótesis nula de no diferencia.
Si... H1 : $\mu_A \neq \mu_B$: Hipótesis alternativa de diferencia.

Dicha prueba fue realizada a los datos provenientes del sitio de Santa Fe, el cual estaba presente dos tratamientos

Modelo 4.- Análisis de Regresión y Correlación lineal simple

$$Y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \epsilon \quad \text{donde,}$$

Y = Variable respuesta x_1 = Variable independiente. β_0 = Intercepto en Y

β_1 = Coeficiente de regresión ϵ = Error experimental

El análisis de regresión y correlación lineal se aplicó a los datos obtenidos de la biomasa de maíz. concentración de Nitrógeno de la biomasa de maíz, (Y) con respecto a las variables de caracterización del suelo: Carbono total, Nitrógeno total, relación C:N, pH, nitrato y Nitrógeno mineral inicial del suelo e índice de N mineralizado (X)

3.9.2. -Aplicación de modelos a variables respuestas

Cuadro 6 Modelos aplicados a variables respuestas de los diferentes experimentos de investigación

Experimento	Variables respuestas	Modelo aplicado
1 Caracterización de los sitios	pH, C total, C:N, N total y Npd	1, 3
2 Incubación aeróbica	Amonio, Nitratos y Nitrógeno mineral.	1, 4
3 Emisión de N ₂ O	Oxido nitroso N ₂ O	2, 4
4 N liberado por árboles (hojas y raíces)	Amonio, Nitratos y N mineral liberados N total del material vegetal.	2, 4
5 Producción de Maíz	Biomasa (Tallos, raíz.) N total extraído	2, 4

Se procedió a aplicar una transformación logarítmica a los datos obtenidos del experimento de mineralización aeróbica para las variables amonio, nitratos y a los datos de emisión de N₂O obtenidos

en el experimento de desnitrificación, con la finalidad de obtener una mayor uniformidad de la varianza según Steel y Torrie 1988. Todos los análisis estadísticos realizados fueron hechos por medio del programa Statistical Analysis Systems, (SAS Institute, 1999) usando el procedimiento GLM (GENERAL LINEAL MODEL); TTEST (PRUEBA DE T); REG (REGRESIÓN LINEAL SIMPLE) Y CORR (CORRELACION, utilizándose para ello el coeficiente de PEARSON).

4.- RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. – Características de los suelos en tres sitios cultivados con café bajo diferentes árboles de sombra

Se realizó el análisis de varianza bajo el modelo de un diseño completamente al azar con efecto anidado de tratamientos dentro de sitios para las características químicas de la capa superficial del suelo (0 – 10 cm). El ANDEVA reflejó diferencias significativas ($P < 0.05$) entre sitios para todas las variables. En lo que respecta a los tratamientos dentro de sitio, se encontraron diferencias en las variables del suelo N mineral ($N-NH_4^+$, $N-NO_3^-$) (Cuadro 7 y Anexo 1).

Cuadro 7 Resultados del ANDEVA del diseño completamente al azar con efecto anidado sobre las características químicas de los suelos con $P > F$.

Factor	Variable						
	C orgánico	N total	C:N	pH H ₂ O	N-NH ₄ ⁺	N-NO ₃ ⁻	N mineral (1)
Sitio	*	**	**	**	**	**	**
	0.0006	<.0001	<.0001	<.0001	0.005	<.0001	<.0001
Tipo de sombra	ns	ns	ns	ns	**	**	**
(sitio)	0.5038	0.1182	0.8985	0.9368	0.0014	<.0001	0.0001

(1) N-mineral = $N-NH_4^+$ + $N-NO_3^-$; ns = no significativo; * = significativo al 5%; ** = significativo al 1%

4.1.1- Comparación de las características de los suelos de los diferentes sitios

Para el sistema de café bajo sombra de *E. deglupta* Blume, que es el único tratamiento presente en todos los sitios, los resultados de las características del suelo de los tres sitios se presentan en el cuadro 8. El suelo de Verde Vigor presentó un contenido de nitrógeno total significativamente más bajo que los suelos de Santa Fe y San Pedro (Cuadro 8). El contenido de C orgánico muestra la misma tendencia que el N total con un nivel más bajo en Verde Vigor que en los otros sitios, pero la diferencia fue significativa solamente al tomar en cuenta todos los tratamientos de cada sitio ($P = 0.0006$).

La baja relación C:N (< 12) del suelo arenoso de San Pedro, supone según la interpretación de esta relación mostrada por Kass (1996), un suministro adecuado de nutrientes al suelo por la descomposición de la materia orgánica, mientras que una relación más alta que 12, como es el caso en Santa Fe y Verde Vigor, sugeriría un suministro más lento de nutrientes al suelo. Sin embargo, esta

interpretación no se verifica con los valores de contenido de N-mineral del suelo determinados al fin de la estación seca, los cuales indican de manera significativa mayor contenido de N-NO₃⁻ y mayor potencial de mineralización en el suelo de Santa Fe (Cuadro 8)

El suelo de Santa Fe, tuvo un pH cerca de la neutralidad, mientras que los suelos de San Pedro y Verde Vigor mostraron pH similares y ligeramente ácidos (Cuadro 8). Esto puede explicar que existe una mayor liberación de nitrógeno y por lo tanto mayor contenido de N mineral, en el suelo de Santa Fe. Dichos resultados concuerdan con aquellos obtenidos por Aarnio Y Martikainen (1995), que encontraron una acumulación de N-NO₃⁻ más baja en condiciones ácidas que en condiciones neutrales

Cuadro 8 Propiedades químicas de la capa del suelo 0 – 10 cm en los tres sitios bajo el sistema café-
Eucalyptus deglupta

Características del suelo	Sitio			Probabilidad
	Verde Vigor	Santa Fe	San Pedro	
C orgánico (%)	4.1 a	6.06 a	4.8 a	0.14
N total (%)	0.25 b	0.40 a	0.44 a	0.02
C:N	16.1 a	14.7 a	10.7 b	0.001
pH H ₂ O	5.5 b	6.5 a	5.4 b	0.007
Humedad (%)	51.6 a	53.9 a	41.7 b	0.015
N-NH ₄ ⁺ (mg N kg suelo ⁻¹)	1.80 a	1.6 a	0.90 a	0.44
N-NO ₃ ⁻ (mg N kg suelo ⁻¹)	6.0 b	16.3 a	10.0 b	0.024
N-mineral (mg N kg suelo ⁻¹)	7.8 b	18.0 a	10.9 b	0.027
*Índice de mineralización (mg N kg suelo ⁻¹ día ⁻¹)	3.8 b	9.4 a	4.8 b	0.0009

Para cada variable, los valores seguidos por la misma letra no son significativamente diferentes (P < 0.05)

*N mineralizado en condiciones anaeróbicas en el laboratorio

El suelo franco arcilloso de San Pedro es formado por aluviones (materiales arrastrado por gravedad) ricos en arena, el cual retiene menos cantidad de agua que los suelos franco arcillosos a arcillosos de Santa Fe y Verde Vigor (Cuadro 9). Estos últimos son Ultisoles, considerados como los suelos más viejos, abarcan aproximadamente un 21% del área del país, presenta fertilidad considerada como baja, problemática de deficiencia de fósforo; sin embargo, si se logra bajar la acidez y se les aumenta la fertilidad es posible utilizarlos para la siembra de muchos cultivos (Bertsch, 1998)

Se puede distinguir que el suelo de Verde Vigor es más arcilloso y de una coloración más roja que el suelo de Santa Fe, sin embargo, el tiene una fertilidad más baja con menos contenidos de C orgánico, N total, N mineral y un pH más bajo (Cuadro 8). A pesar de la diferencia de material parental con el suelo de Santa Fe, las características del suelo de Verde Vigor parecen ser consecuencias del manejo anterior de la tierra. El arrastre de suelo y el continuo laboreo del mismo pudo haber causado la erosión y la eliminación de la capa superficial Bertsch, (1998) señala que las prácticas de manejo como mecanización intensiva tienden a modificar y deteriorar irreversiblemente las características naturales y las condiciones físicas de estos suelos

Cuadro 9 Características físicas de la capa del suelo 0-10 cm y uso anterior de la tierra en Verde Vigor, Santa Fe y San Pedro

Sitio	Arena	Limo	Arcilla	Textura	Color-Munsell	Uso anterior de la tierra
	%					
Verde Vigor	40.1	22.6	37.1	Franco arcilloso a arcilloso	Rojizo 5 YR	Caña de azúcar
Santa Fe	55.0	21.6	23.4	Franco-arcilloso	Pardo 7.5 YR	Pastos
San Pedro	72.4	21.7	5.8	Franco-arenoso	Gris pardo 10 YR	Caña de azúcar

4.1.2- Comparación de las características de los suelos bajo los diferentes tipos de sombra

La comparación de los tratamientos que representan el tipo de sombra, se efectuó dentro de cada sitio (Cuadro 10) En la capa de suelo 0 - 10 cm, las variables C orgánico, N total, C : N y pH no mostraron grandes diferencias entre los tipos de sombra presentes en Verde Vigor y Santa Fe, no obstante, en San Pedro, *T. ivorensis*, mostró contenidos de C orgánico y N total más altos que *E. deglupta* y *E. poeppigiana*. Este fenómeno podría resultar de un efecto de micrositio más que un efecto de especie, dado que había solamente una parcela por especie en este sitio. Esto puede confirmarse, debido a que el suelo bajo *E. poeppigiana*, tenía un contenido de N mineral dos veces más alto que el suelo bajo *T. ivorensis*. Los contenidos de N-NO₃⁻ del suelo en San Pedro y Santa Fe, mostraron diferencias significativas entre los tipos de sombra. En San Pedro el suelo bajo *Inga* sp. presentó contenidos de nitratos más altos que bajo los árboles maderables como *Terminalia* spp. y *E. deglupta*, mientras que *E. poeppigiana* se ubicó en posición intermedia entre los dos, indicando el efecto favorable de las especies leguminosas sobre el contenido de N mineral en el suelo. En Santa Fe el café a pleno sol obtuvo un contenido de nitratos más alto que el café bajo sombra de *E. deglupta*.

Así mismo, en Verde Vigor, la leguminosa *E. poeppigiana* y la parcela a pleno sol presentaron más contenidos de N-NO_3^- que los maderables aunque las diferencias no fueron significativas. Puesto que los nitratos representan una gran proporción del N mineral total en San Pedro y Santa Fe (de 70 a 98 %) los contenidos de nitrógeno mineral siguen la misma tendencia que el nitrato

Los altos contenidos de N-NH_4^+ en el suelo de Verde Vigor (desde 23 a 50% del N mineral), podrían significar un menor potencial de nitrificación que en los otros suelos. Bersch (1998) señala que el proceso de nitrificación puede ser bajo en suelos rojos; Rivero (1999); Fassbender y Bornemisza (1987), indican que la presencia de altos contenidos de arcilla disminuye el proceso de mineralización. Estos resultados concuerdan con Montagnini y Buschbacher (1989) que encontraron que la mineralización del nitrógeno y las tasas de nitrificación fueron mayores en un bosque sobre Oxisol que en un bosque sobre Ultisol

Aunque el contenido de N total del suelo pueda ser menor bajo leguminosas (poró) que bajo maderables (*T. ivorensis* A Chev.), como en el caso de San Pedro, la leguminosa siempre tiene niveles de N mineral en el suelo más altos confirmando el efecto positivo de la leguminosa sobre este parámetro. Como las plantaciones de Verde Vigor son más jóvenes que las plantaciones de San Pedro, esto podría explicar el menor efecto sobre el contenido de N mineral del suelo por la leguminosa *E. poeppigiana* en el sitio de Verde Vigor.

Los menores contenidos de N mineral y N-NO_3^- encontrados al final de la estación seca bajo maderables (Cuadro 10) pueden deberse a una mayor absorción ó a una menor mineralización y nitrificación que en situaciones de café a pleno sol o bajo leguminosas. Mientras las tasas de nitrógeno potencialmente mineralizable (Npm) de los suelos obtenidos en el laboratorio en condiciones anaeróbicas no mostraron ninguna diferencia significativa entre especies, sin embargo muestran una tendencia en que siempre las leguminosas tuvieron un nivel superior a los otros tipos de sombra que son maderables y pleno sol en San Pedro y Verde Vigor. Esta tendencia concuerda con los resultados obtenidos por Mogollón *et al.*, (1997) en plantaciones de café manejadas bajo diferentes árboles de sombra. Este estudio indica valores de Npd significativamente más altos en suelos de plantación de café bajo *Inga sp* que en los suelos de plantaciones de café manejados con sombra de cítricos. Los resultados obtenidos por Vilas (1990) también muestran que los valores de N mineralizado obtenidos "in situ" fueron más altos en el sistema de café con poró que en sistema de café con laurel

Cuadro 10 - Propiedades químicas de la capa del suelo de 0-10 cm bajo los diferentes tipos de sombra dentro de cada sitio

Tipos de sombra	C (%)	N (%)	C:N	pH H ₂ O	(mg N kg ⁻¹ suelo)			Mineralización anaeróbica (mg N kg ⁻¹ suelo d ⁻¹)
					N-NH ₄	N-NO ₃	Nmin	
Verde Vigor								
<i>E. deglupta</i>	4.19 a	0.25a	16.1a	5.56a	1.8 b	6.0 a	7.83 a	3.84 a
<i>E. poeppigiana</i>	4.56 a	0.27a	16.5a	5.63a	2.1 b	9.6 a	11.73 a	3.89 a
<i>T. ivorensis</i>	3.62 a	0.22a	15.7a	5.56a	4.5ab	5.1 a	9.73 a	2.73 a
Café a pleno sol	4.13 a	0.25a	16.1a	5.60a	7.6 a	7.5 a	15.16 a	3.68 a
<i>Pr > F</i>	0.82	0.79	0.92	-0.98	0.05	0.13	0.21	0.65
Santa Fe								
<i>E. deglupta</i>	6.06 a	0.40a	14.7a	6.56a	1.66 a	16.33 b	18 b	9.42 a
Café a pleno sol	5.67 a	0.4 a	14.2a	6.86a	0.56 a	41.66 a	42.2 a	9.21 a
<i>Pr > t</i>	0.18	0.78	0.17	0.05	0.061	0.01	0.01	0.87
San Pedro								
<i>E. deglupta</i>	4.82b	0.44b	10.7a	5.43a	0.9 ab	10.03 b	10.93 a	4.81 a
<i>E. poeppigiana</i>	4.79b	0.45b	10.6a	5.43a	1.7 ab	15.3 ab	17.0 a	5.54 a
<i>Inga sp</i>	5.7ab	0.5ab	11.0a	5.36a	2.03a	18.0 a	20.0 a	5.31 a
<i>T. ivorensis</i>	6.11a	0.57a	10.5a	5.46a	0.06b	9.63b	9.7 a	4.90 a
T amazonia	5.3ab	0.5ab	10.3a	5.43a	4.2 a	9.73b	13.9 a	4.74 a
<i>Pr > F</i>	0.03	0.03	0.28	0.96	0.03	0.023	0.058	0.93

Dentro de cada sitio y para cada variable los valores seguidos por la misma letra no son significativamente diferentes a $P < 0.05$

4.2. Dinámica del N mineral del suelo en incubación aeróbica "in vitro"

Durante la incubación aeróbica a 28 ° C en laboratorio los contenidos de N mineral de los suelos fueron drásticamente reducidos tanto en condiciones de alta humedad (suelo a Capacidad de Campo) y a una menor humedad (suelos a 80% de CC) (Figura 3) Este efecto se produjo para todas las muestras de suelo de los tres sitios y tratamientos. Se observó un descenso brusco del contenido de N mineral

durante los siete primeros días de incubación y esta disminución continuó hasta el final del periodo de incubación (5 semanas)

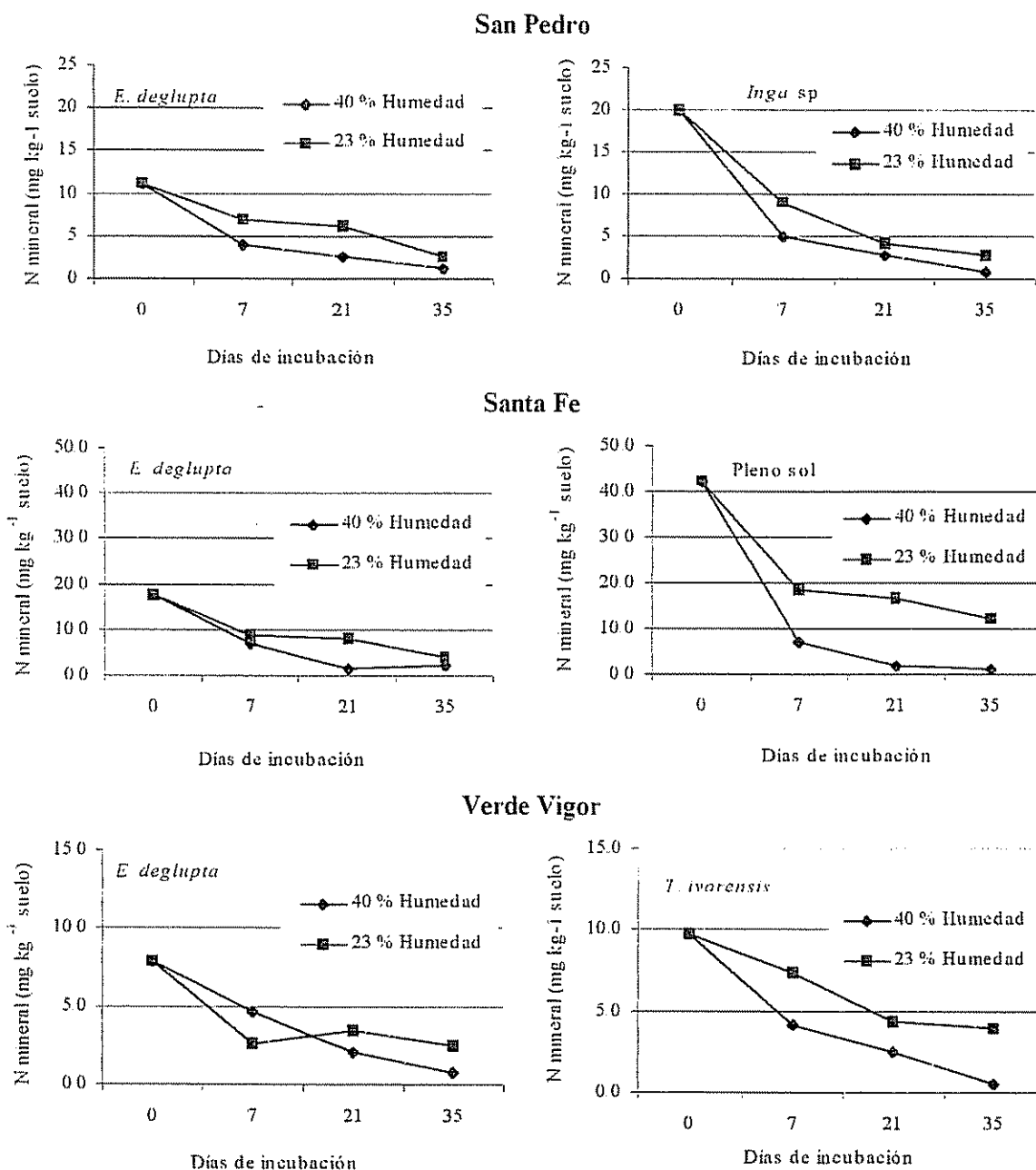


Figura 3 – Evolución del contenido de N mineral del suelo en incubación aeróbica en laboratorio bajo diferentes condiciones de humedad

En los suelos de Verde Vigor se determinaron los mayores contenidos iniciales de amonio (Figura 4). Si el amonio representa un 36% del N mineral en Verde Vigor, este representó solamente 12% y 4% en San Pedro y Santa Fe, respectivamente. El amonio se mantuvo generalmente a su nivel inicial durante

los siete primeros días y después bajó drásticamente hasta el final de la incubación. Las proporciones de amonio fueron similares en los sitios al término de 35 días de incubación, oscilando entre el 23 al 30% en Verde Vigor y Santa Fe, respectivamente. El sitio de San Pedro se situó en posición intermedia.

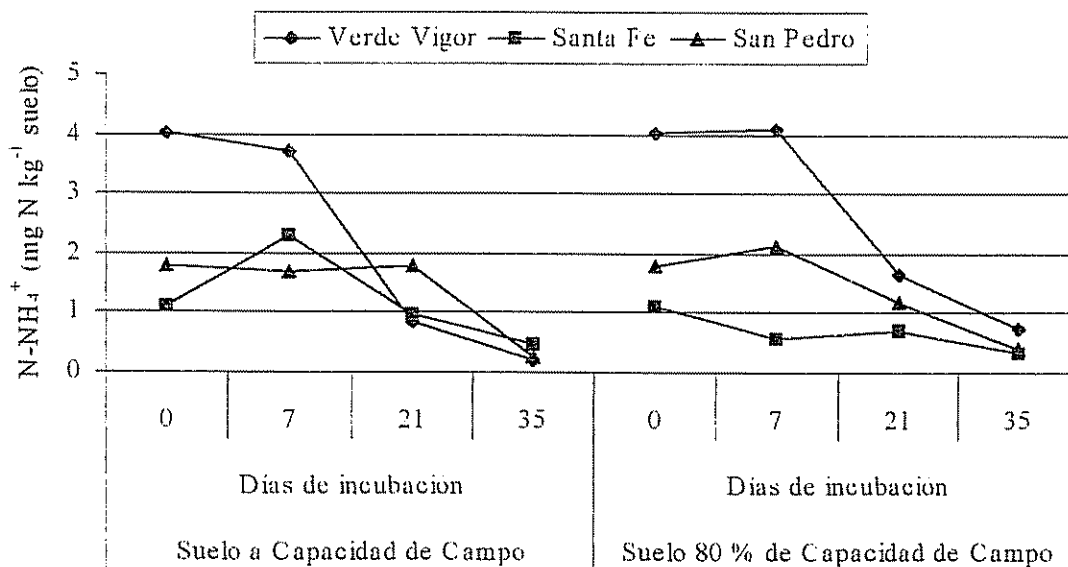


Figura 4 - Evolución de los contenidos de amonio del suelo (mg N kg^{-1} de suelo) en incubación aeróbica en laboratorio bajo diferentes condiciones de humedad.

Las pérdidas de N mineral registradas estuvieron acordes al contenido de sustrato inicial encontrados en los sitios, es decir que en Santa Fe se registraron las mayores pérdidas bajo los dos estados de humedad del suelo, seguido de San Pedro y finalmente en Verde Vigor se dieron las menores pérdidas (Cuadro 11).

En el cuadro 12 y anexo 2, se indican las diferencias significativas entre las humedades cuanto a la tasa de pérdida de N mineral durante los siete primeros días de incubación; tomando en cuenta los 35 días no hubo diferencias significativas entre humedades. Eso significa que entre más húmedo fue el suelo, más rápida fue la desaparición del N mineral al inicio del periodo. Además, se observa en el Cuadro 13, correlaciones significativas entre la pérdida de N y el contenido inicial de N mineral en el suelo. Entre más alto fue el contenido inicial de N mineral del suelo más importante fue la pérdida de N mineral a los 7 o 35 días de incubación aeróbica.

La comparación de tratamientos dentro de cada sitio en la condición más húmeda no mostraron diferencias significativas respecto al N mineral perdido durante el tiempo de incubación. Únicamente

para los tratamientos procedentes de San Pedro, con los suelos a un 80% de su CC, se detectaron diferencias significativas entre los tratamientos obteniendo las tasas de pérdidas más altas en las especies leguminosas (Anexo 3).

Cuadro 11 - Nitrógeno mineralizado acumulado y tasas de pérdidas (mineralización negativa) durante la incubación aeróbica "in vitro" bajo dos condiciones de humedad de suelo en los tres sitios

Sitio	N mineralizado (mg N kg ⁻¹ suelo) (en días)		Tasas de pérdidas de N mineral (mg N kg ⁻¹ suelo día ⁻¹)		N mineral (mg N kg ⁻¹ suelo)	Humedad (%)		
	0 - 7	7 - 35	0 - 7	7 - 35				
Suelos a Capacidad de Campo								
Periodo de incubación (días)	0 - 7	7 - 35	0 - 7	7 - 35	Total perdido	% de pérdidas	Inicial	-
Verde Vigor	-3.12 c	-7.18 a	-0.44 c	-0.26 a	-10.3	93	11.11 b	51.6
Santa Fe	-20.65 a	-7.88 a	-2.95 a	-0.28 a	-28.53	95	30.11 a	53.0
San Pedro	-10.12 b	-3.22 b	-1.44 b	-0.11 b	-13.34	93	14.33 b	41.7
<i>Pr > F</i>	0.0003	0.018	< 0.0001		-	-	< 0.0001	-
Suelo a 80 % de la Capacidad de Campo								
Verde Vigor	-1.48 a	-5.71 b	-0.21 b	-0.20 b	-7.19	65	11.11 b	33.5
Santa Fe	-11.88 b	-10.12 a	-1.68 a	-0.36 a	-22.00	73	30.11 a	35.8
San Pedro	-5.82 ab	-5.68 b	-0.83ab	-0.20 b	-11.51	80	14.33 b	26.6
<i>Pr > F</i>	0.0094	0.0003	0.0166		-	-	< 0.0001	-

Por cada humedad y por cada columna los valores seguidos por la misma letra no son significativamente diferentes a una $P < 0.05$.

Las pérdidas constantes de N mineral en la incubación aeróbica en el laboratorio significan que dos procesos pudieron ocurrir: sea una inmovilización de los nitratos por los microbios, o una desnitrificación. En nuestras condiciones de laboratorio se mantuvo las humedades de las muestras de suelo a nivel alto, casi sin pérdida de agua. Entonces la ausencia del proceso de humectación-desección pudo haber creado condiciones anaeróbicas favorables para el proceso de desnitrificación. También el contenido alto de N mineral en particular de $N-NO_3^-$ del suelo al final de la estación seca pudo favorecer la pérdida de nitrógeno probablemente por inmovilización o por desnitrificación.

Cuadro 12 - Tasas de pérdidas registradas durante la incubación aeróbica "in vitro" bajo dos condiciones de humedad del suelo

Estado	Tasa de pérdidas de N mineral (7 días)	Tasa de pérdidas de N mineral (28 días)	Humedad (%)
Más Húmedo	-1.3 a	-0.53 a	47.55
Menos Húmedo	-0.77 b	-0.42 a	30.84
<i>P_r > F</i>	0.01	0.008	-

Por cada columna los valores seguidos por la misma letra no son significativamente diferentes a una $P < 0.05$

Cuadro 13. Correlaciones entre las tasas de desaparición del nitrógeno y N_{min} inicial del suelo en estado más y menos húmedos de los suelos de Verde vigor, Santa Fe y San Pedro

Variables	Tasa de desaparición a 7 días	Tasa de desaparición a 35 días
	Más húmedo	
N _{min} inicial (mg N kg ⁻¹ suelo)	- 0.94 (<0.0001)	- 0.99 (<0.0001)
	Menos húmedo	
N _{min} inicial (mg N kg ⁻¹ suelo)	- 0.84 (<0.0001)	- 0.97 (<0.0001)

4.3 -. Estimación de la pérdida de nitrógeno en forma de óxido nitroso (N₂O) durante la incubación aeróbica

Para identificar la naturaleza de las pérdidas de N mineral observadas durante la incubación aeróbica de los suelos, se llevó a cabo un experimento con la finalidad de medir la emisión de óxido nitroso (N₂O) que pudo ocurrir durante esta incubación. La emisión de N₂O durante una hora fue medida un día después de iniciar con la incubación aeróbica de los suelos. Para tener una distribución normal de los datos de emisión de N₂O, se hizo una transformación logarítmica de los resultados y se hicieron los análisis estadísticos a partir de estos datos.

Como se observa en la Figura 5, la emisión de N₂O fue más alta en las condiciones de humedad más alta (capacidad de campo), especialmente en San Pedro y Santa Fe y para estos sitios la diferencia con las condiciones de humedad a 80% de capacidad de campo fue altamente significativa ($P < 0.0001$). También hubo una relación positiva entre la pérdida N₂O (Ln N-N₂O) y la humedad del suelo (Figura 6).

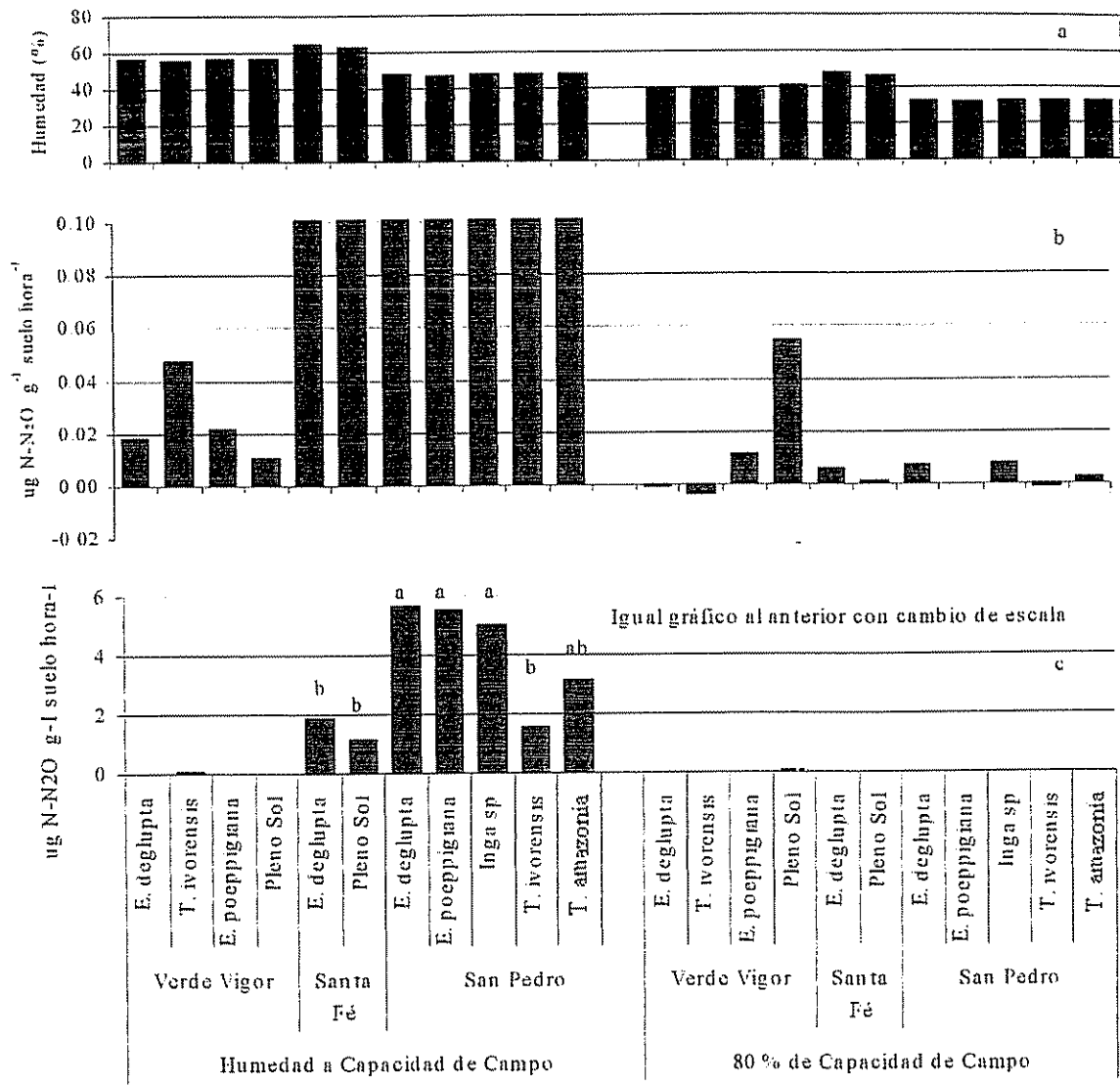


Figura 5: Emisión de óxido nítrico (N_2O) bajo condiciones de más y menos humedad en laboratorio. a = humedad; b = c = con cambio de escala: $N-N_2O$

Si a humedad alta (capacidad de campo), las emisiones de N_2O deben ser principalmente el producto de la desnitrificación: a humedad más baja (80% de la capacidad de campo), la fuente de emisión de N_2O podría ser la nitrificación (Davidson, 1991; Ute Skiba, comunicación personal). Eso podría explicar la diferencia de comportamiento entre los dos niveles de humedad estudiados aquí porque la desnitrificación que produce normalmente el flujo de N_2O más alto ocurre en condiciones de anaerobiosis, favorecidas por niveles de humedad más altos. Además, Russel (1976) mencionó que en el suelo a capacidad de campo, los procesos de nitrificación y desnitrificación pueden ocurrir simultáneamente con condiciones de anaerobiosis localizadas en los agregados del suelo, lo que

favorecería la pérdida de N_2O . Con el nivel de humedad más alto, se observó una producción de N_2O significativamente menor ($P = 0,0002$) en Verde Vigor que en los otros sitios

Además, hubo diferencias significativas entre tipos de sombra, solamente en San Pedro (Figura 5), especialmente con el nivel de humedad más alto y las emisiones más alta correspondieron a las especies *Inga sp.*, *E. poeppigiana* y *E. deglupta*. Pero las tendencias no se repitieron en condiciones de humedad más baja y los resultados fueron contradictorios

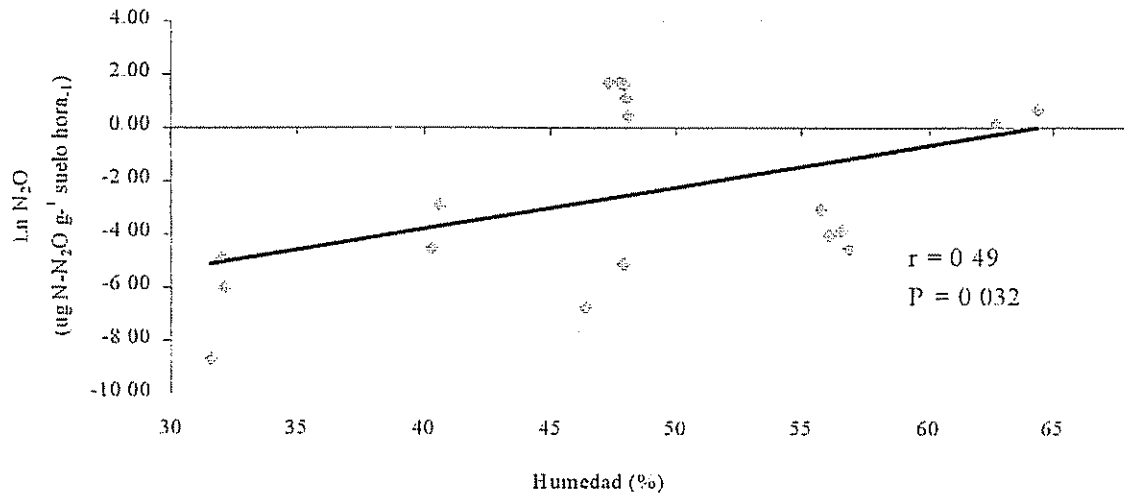


Figura 6 - Relación entre el flujo de N_2O y la humedad del suelo

Hubo correlación significativa entre la emisión de N_2O y los contenidos de C orgánico y N total del suelo, pero no hubo correlación con otras variables del suelo como los niveles de NO_3^- y N mineral inicial y la pérdida de N mineral durante la incubación aeróbica. El bajo nivel de emisión de N_2O a humedad alta en Verde Vigor pudo ocurrir dado que la desnitrificación pudo ser limitada por menos disponibilidad de C que en los otros sitios

Robertson y Tiedje (1987) llegaron a la conclusión de que la desnitrificación era limitada por la disponibilidad de carbono, aunque las cantidades de $N-NO_3^-$ sean altas. Además, Babbar y Zak (1995) encontraron un incremento significativo del 54% de la desnitrificación y producción de N_2O cuando hubo más C y menos O_2 bajo condiciones anaeróbicas (+C= 8396 y -C= 2985 $\mu g N_2O-N kg^{-1} d^{-1}$) y (-O=6656 y +O= 4331 $\mu g N_2O -N kg^{-1} d^{-1}$)

Como se puede observar en el Cuadro 14 los suelos perdieron la totalidad de su contenido de N mineral en forma de N_2O dentro de unas horas o unos días en condiciones de humedad alta; entonces, el

proceso de desnitrificación puede ser un proceso muy activo y rápido. En algunos casos, el 50% del N mineral inicial fue liberado como N_2O durante una hora de incubación. Hubiese sido más conveniente comparar la emisión de N_2O con la tasa de mineralización que emplear las concentraciones iniciales de NH_4 y NO_3 . de todas formas, estos resultados sugieren que las pérdidas de N por emisión de N_2O pueden ser muy altas. Para concluir, durante la incubación aeróbica de los suelos a 28 °C en laboratorio, la principal pérdida de N mineral debió ser: en condiciones de humedad a capacidad de campo la emisión de óxido nitroso por desnitrificación y en condiciones de humedad más baja la inmovilización en el suelo y la emisión de óxido nitroso también. Durante el proceso de desnitrificación, pudo ocurrir también la pérdida de N en forma molecular (N_2).

Cuadro 14. N liberado en forma de N- N_2O durante una hora después de un día de incubación aeróbica

Variables	Sitio						
	San Pedro		Santa Fe		Verde Vigor		
Humedad de suelo	48 %	32 %	64 %	47 %	56 %	40 %	
	(CC)	(80%CC)	(CC)	(80%CC)	(CC)	(80%CC)	
Pérdida de N- N_2O / hora (μg N / g de suelo)	4.174	0.003	1.533	0.004	0.024	0.015	
Pérdida de N- N_2O / hora	Promedio	29.34	0.02	6.71	0.02	0.24	0.10
(% de N mineral inicial)	Máximo	51.22	0.04	10.63	0.03	0.49	0.36
Tiempo para pérdida total del N mineral inicial del suelo		3.4	191 días	14	220 días	17 días	41 días
		horas		horas			

4.4 - Liberación de Nitrógeno de hojas y raíces de las especies de sombra

La mineralización del nitrógeno ocurre en la hojarasca y en la parte superior del suelo mineral. El objetivo de este experimento fue de evaluar el potencial de liberación de nitrógeno de los residuos de especie de sombra (hojas, hojarasca, raíces). Por eso, los residuos fueron mezclados con suelo y puesto en incubación aeróbica en el laboratorio. Los contenidos de N de los residuos están presentados en el Cuadro 15.

Las hojas verdes de poró que son el producto de la poda presentan la concentración de N la más alta. La hojarasca fresca de *Inga* sp tuvo concentración de N (1.72%) similar a la de las maderables (1.53 - 1.73%). Por ambos tipos de residuos (hojarasca y raíces), *E. deglupta* tiene las concentraciones de N las más bajas de todas las especies. En raíces que son menos ricas en N que la hojarasca, el poró tiene la concentración más alta mientras que la *Inga* sp tiene una concentración intermedia entre el poro y los maderables.

Como se ve en la figura 7 y el cuadro 16, durante un día de incubación, todos los residuos vegetales mostraron liberación de N excepto *E. deglupta* que inmovilizó N. Las hojas de poro tuvieron la mayor producción de N mineral en relación con su alta concentración en N (3,8 %). La hojarasca de *Inga* sp se mineralizó menos rápidamente que la hojarasca de *T. ivorensis* y *T. amazonia*. En el caso de las raíces, las leguminosas se mostraron superiores en la liberación de N e *Inga* sp presentó la tasa más alta de producción de N.

Cuadro 15 - Concentración de N en los residuos de especies de sombra.

Parte	Especie	N (%)
Hoja	<i>E. deglupta</i>	1.53
	<i>Inga</i> sp	1.72
	<i>E. poeppigiana</i>	3.8
	<i>T. ivorensis</i>	1.62
	<i>T. amazonia</i>	1.73
Raíz	<i>E. deglupta</i>	0.52
	<i>Inga</i> sp	1.38
	<i>E. poeppigiana</i>	2.19
	<i>T. ivorensis</i>	0.68
	<i>T. amazonia</i>	0.79

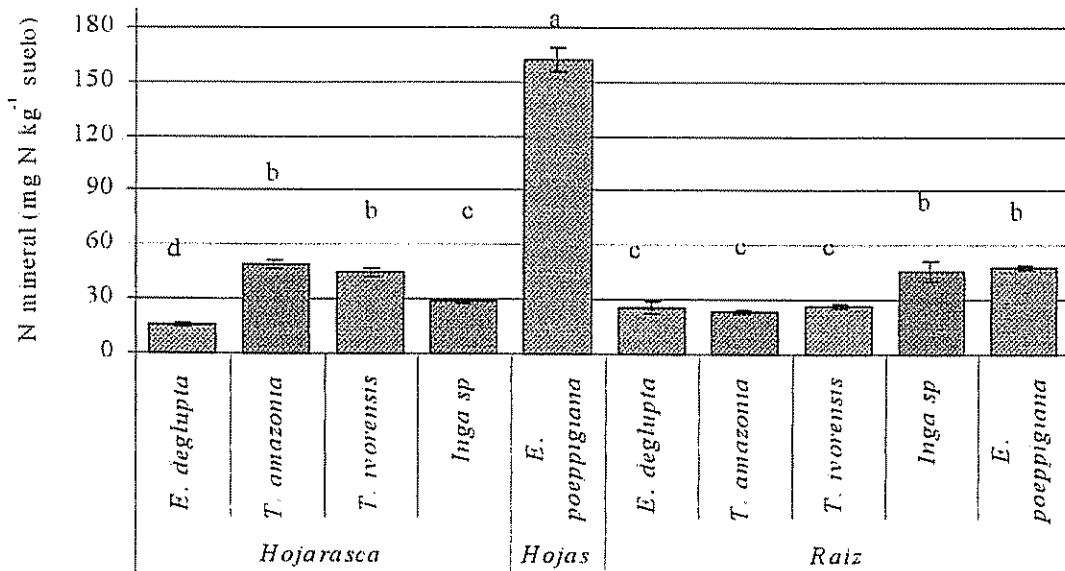


Figura 7 - N mineral liberado por residuos vegetales en mezcla con suelo en incubación aeróbica

De 1 a 7 días de incubación, la leguminosa poró incrementó su tasa de liberación de N en hojas (Cuadro 16) y no liberó más N en las raíces, mientras que los maderables mostraron una fuerte reducción de las tasas de liberación correspondiente a una inmovilización de N en todos los residuos durante este periodo *Inga* sp mostró también una inmovilización de N en la hojarasca y un equilibrio en las raíces. Estos resultados confirman el efecto positivo de las leguminosas sobre la liberación de N en el suelo, pero también el comportamiento variable de ellas. Por ejemplo se confirmó la velocidad baja de descomposición de la hojarasca de *Inga* sp con respecto a las hojas de poró.

Similares resultados fueron obtenidos por Palm y Sánchez (1991) confirmando que no todas las hojas de leguminosas se descomponen y mineralizan el N rápidamente, pese a las altas concentraciones de N en las hojas y reportaron que la mineralización neta del nitrógeno ocurre si la concentración del N de las mismas es un 2% y por el contrario se produce la inmovilización si la concentración es inferior a está.

Cuadro 16 - N mineral liberado por residuos vegetales (en mezcla con suelo) después de un día y 7 días de incubación aeróbica en laboratorio.

Parte	Especies	N mineral	Tasas de	N mineral	Tasas de
		liberado	liberación de N	liberado	liberación de N
		mg N kg ⁻¹ suelo ⁻¹	% N del vegetal	mg N kg ⁻¹ suelo ⁻¹	% N del vegetal
		1 día		7 días	
Hojas	<i>E. deglupta</i>	-7.0 d	-1.5 d	-30.8 e	-6.4 e
	<i>Inga</i> sp	6.1 c	1.5 c	-13.6 d	-3.4 d
	<i>E. poeppigiana</i>	139.2 a	6.7 a	618.2 a	29.7 a
	<i>T. ivorensis</i>	22.0 b	4.1 b	-8. cd	-1.5 c
	<i>T. amazonia</i>	26.5 b	4.8 b	4. c	0.7 b
Raíces	<i>E. deglupta</i>	1.9 c	0.7 b	-13.9 d	-4.8 c
	<i>Inga</i> sp	22.8 b	8.4 a	19.6 b	7.2 a
	<i>E. poeppigiana</i>	25.2 b	1.0 b	20.6 b	0.8 b
	<i>T. ivorensis</i>	4.3 c	1.3 b	-15.3 de	-4.7 c
	<i>T. amazonia</i>	0.9 c	0.3 b	-16.3 de	-4.5 e
Pr > F		< 0.0001	< 0.0001	< 0.0001	< 0.0001

Por cada columna los valores seguidos por la misma letra no son significativamente diferentes a una P < 0.05

Heal *et al* (1997) destacaron la importancia de la composición química de la planta usada como material de descomposición en la tasas de mineralización del N. En el presente estudio, se dio una fuerte correlación positiva y significativa entre la cantidad de N liberado por los residuos y el contenido de N de las hojas y de las raíces (Cuadro 17). En la misma vía, Myers *et al.*, (1997), enunciaron que los residuos altos en taninos presentan una demora en la liberación de nutrientes, lo que podría ser el caso de los maderables en nuestro estudio.

Cuadro 17.- Relación entre la liberación de N por los residuos y la concentración inicial en hojas y raíces de los árboles

Variable	Concentración de N en hojas (%)		Concentración de N en raíces (%)	
	r	P	r	P
N mineral liberado en hojas	0.98 **	0.0033	0.85	0.60
N mineral liberado en raíces	0.69	0.19	0.92 *	0.02

Estos resultados confirman el efecto positivo de las leguminosas sobre la liberación de N en el suelo, pero también mostraron el comportamiento variable de estas. Por ejemplo, se confirmó la velocidad baja de descomposición de la hojarasca de *Inga* sp. con respecto a las hojas de poró.

4.5 - Producción de biomasa y extracción de nitrógeno por *Zea mays*, en condiciones de invernadero

El maíz fue utilizado como un indicador de la disponibilidad de nutrientes en los suelos, para los diferentes tratamientos (café bajo leguminosas, café bajo maderables ó café a pleno sol) en cada sitio de estudio. La respuesta de la planta fue obtenida por la producción de biomasa y extracción de nitrógeno al final de la etapa vegetativa del maíz bajo condiciones de invernadero. La cosecha se realizó, a los 45 días después de la germinación.

A continuación se hará una descripción por separado del efecto de sitio utilizando el tratamiento sombra de *E. deglupta* y del efecto del tipo de sombra dentro de cada sitio. Después se relacionan estas variables del maíz (materia seca y contenido de nitrógeno) con las características del suelo, la calidad de la materia orgánica producida por los árboles de sombra (%N y N liberado por las hojas y raíces).

Efecto del sitio

La producción de biomasa de maíz en los suelos de los diferentes sitios sugiere la siguiente tendencia: San Pedro = Santa Fe > Verde Vigor aún cuando se determinó por separado la producción de hoja y raíz (Cuadro 18). Debido a las mayores concentraciones en nitrógeno del maíz producido con el suelo Santa Fe, las cantidades de N extraídas siguen el orden siguiente: Santa Fe \geq San Pedro > Verde Vigor. La producción total de maíz en condiciones de invernadero confirma los resultados obtenidos en la caracterización de los suelos. Los suelos de Verde Vigor produjeron la menor biomasa, con una baja concentración en nitrógeno, esto puede ser relacionado con el menor contenido de carbono orgánico, nitrógeno total, N mineral del suelo y potencial de mineralización del N que reflejan una menor disponibilidad de N y puede ser de otros elementos nutritivos. Esta misma tendencia ha sido reportada por Aguiar (2001), mostrando que la respuesta del maíz en suelos Ultisoles perteneciente a San Isidro del General (Cantón de Pérez Zeledón) tienen una menor producción de materia seca en maíz y contenido de nitrógeno que los tipos de suelo como Ultisol –Grecia, Molisol y Andisol.

Cuadro 18. Producción de biomasa (MS) y extracción de nitrógeno por el maíz cultivado durante 45 días en suelos provenientes de los diferentes sitios bajo *Eucalyptus degluta*

Variables	Sitios			Probabilidad
	Verde Vigor	Santa Fe	San Pedro	
Hojas y tallos				
Materia seca en g planta ⁻¹	1.3 b	3.7 a	3.5 a	0.006
Concentración de N (%)	0.86	1.06	0.74	--
Contenido de N en mg N planta ⁻¹	11.4 c	39.8 a	26.2 b	0.003
Peso seco de Raíces				
Materia seca en g planta ⁻¹	1.4 b	2.3 a	2.8 a	0.01
Concentración de N (%)	0.84	0.93	0.84	--
Contenido de N en mg N planta ⁻¹	11.9 b	21.8 a	23.7 a	0.015
Peso seco total				
Materia seca en g planta ⁻¹	2.7 b	6.1 a	6.3 a	0.008
Concentración de N (%)	1.7	1.9	1.6	--
Contenido de N en mg N planta ⁻¹	23.4 b	61.6 a	50.0 a	0.006

Para la misma línea, los valores seguidos por la misma letra no son significativamente diferentes ($P < 0.05$).

En el presente estudio los contenidos de nitrógeno no alcanzaron los niveles adecuados que este cultivo requiere (3.5 - 5 %), los que han sido señalados por Bertsch, (1998) En Santa Fe, los suelos produjeron la biomasa con el mayor porcentaje de nitrógeno en la materia seca, esto está en conformidad con el mayor contenido de N mineral inicial y el mayor potencial de mineralización del nitrógeno del suelo en Santa Fe

Efectos de especies

La producción de biomasa de maíz con los suelos proveniente de cada tipo de sombra, en el sitio San Pedro mostró diferencias significativas entre las especies (Figura 8a; Anexo 5). El suelo bajo *E. poeppigiana* produjo una biomasa total de maíz más alta que los suelos bajo maderables

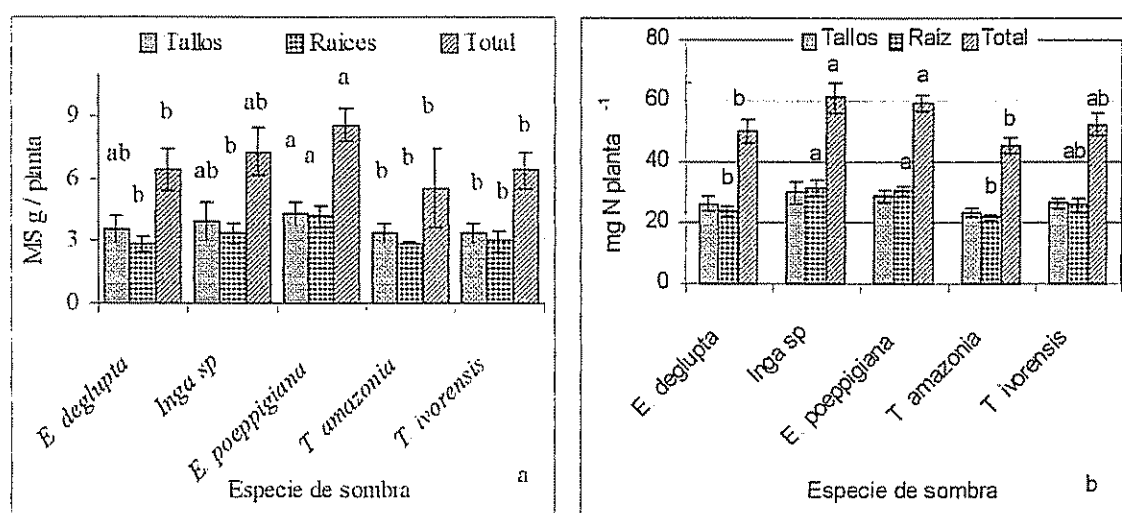


Figura 8.- Producción de biomasa (g de MS planta⁻¹) y contenido de N (mg N planta⁻¹) de maíz cultivado durante 45 días en suelos provenientes de parcelas con diferentes tipos de sombra en San Pedro. Para el mismo componente, los valores seguidos por la misma letra no son significativamente diferentes (P < 0.05).

La biomasa producida con el suelo proveniente de la parcela con *Inga sp.* marcó una producción intermedia, no obstante obtuvo el mejor porcentaje de nitrógeno total. Las leguminosas mostraron también las mayores extracciones de nitrógeno por parte del maíz

Para los otros sitios, Santa Fe y Verde Vigor no hubo diferencias significativas entre tipos de sombra, (Figura 9, 10 y Anexo 5), respecto a la producción de biomasa y a la extracción de nitrógeno por el maíz. En Verde Vigor hay una tendencia con mayor biomasa de maíz en suelo proveniente de parcelas con poró.

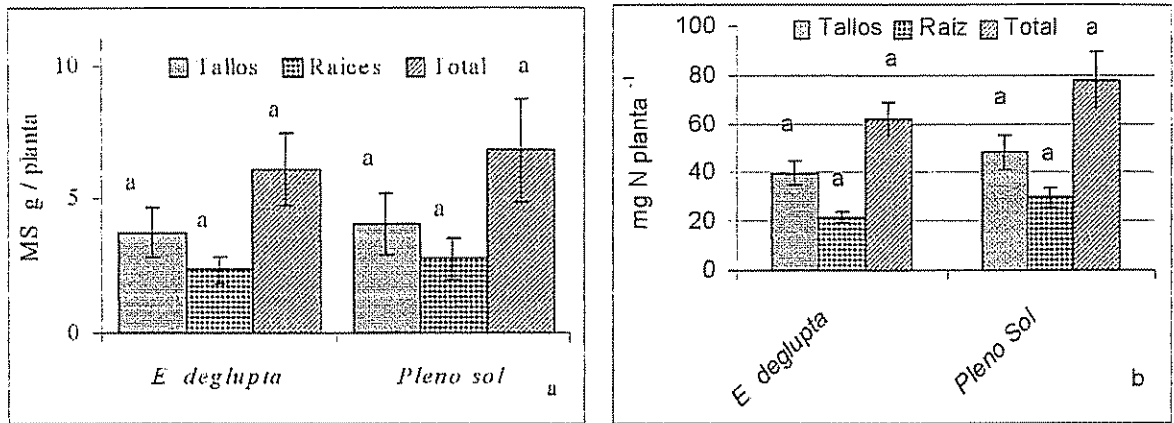


Figura 9.- Producción de biomasa (g de MS planta⁻¹) y contenido de nitrógeno (mg N planta⁻¹) de maíz cultivado durante 45 días en suelos provenientes de parcelas con diferentes tipos de sombra en Santa Fe.

Si las especies leguminosas especialmente el poro, mostraron un efecto positivo y significativo sobre la producción de maíz en San Pedro, el efecto parece ser mínimo en Verde Vigor. Posiblemente este comportamiento es debido a la diferencia de edad de las parcelas y a su manejo. Las parcelas de Verde Vigor tienen solamente cuatro años de establecimiento mientras que las parcelas de San Pedro tienen seis años y además el poró en San Pedro estaba mejor establecido y manejado de modo que estaba con más desarrollo foliar durante un tiempo más largo. Por lo tanto en San Pedro, el poró ha podido contribuir más que en Verde Vigor al ciclaje de nutrientes.

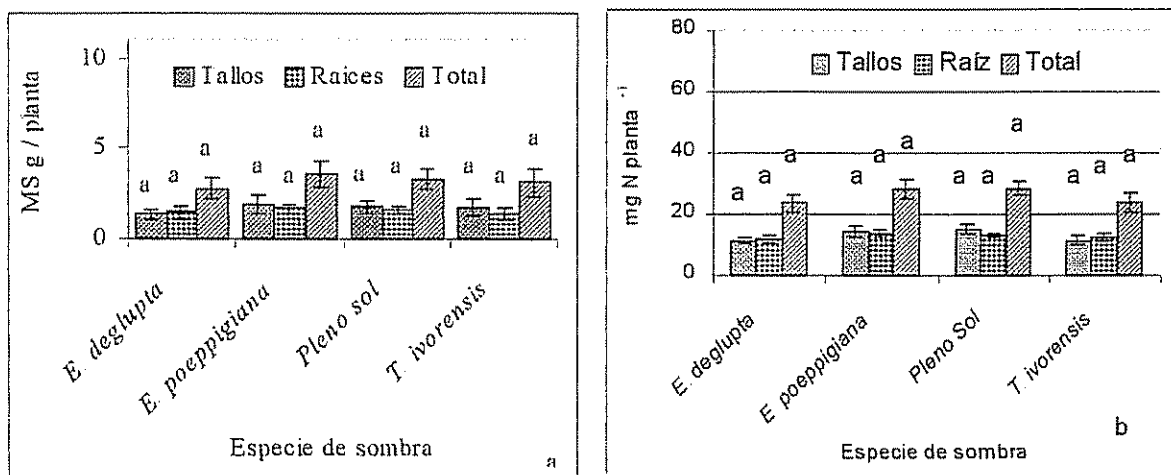


Figura 10.- Producción de biomasa (g de MS planta⁻¹) y contenido de nitrógeno (mg N planta⁻¹) de maíz cultivado durante 45 días en suelos provenientes de parcelas con diferentes tipos de sombra en Verde Vigor.

Los resultados del presente estudio concuerdan con los reportados por Vilas (1990), quién expresa que en plantaciones más desarrolladas (13 años) de café con poró y café con laurel las tasas de mineralización de nitrógeno del suelo "in situ" fueron significativamente mayores bajo poró

De manera global (todos los sitios confundidos), las características del suelo que tuvieron las mejores correlaciones con la producción de biomasa de maíz (Cuadro 19) fueron en orden decreciente: el contenido de N total, la relación C : N y el C orgánico. Solamente la biomasa de tallo se relacionó con el contenido inicial de NO_3^- del suelo y con el potencial de mineralización de N

La extracción de N por los diferentes componentes del maíz tuvo las mejores correlaciones con el N potencialmente mineralizable y el contenido inicial de NO_3^- del suelo. Otras variables bien correlacionadas fueron los contenidos de C orgánico y N total

Cuadro 19. Correlaciones entre características químicas del suelo con la biomasa y el contenido de N del maíz cultivado en suelos de los distintos tratamientos y los sitios

Variables	Materia seca en g planta ⁻¹			Contenido de nitrógeno en mg N planta ⁻¹		
	Tallos	Raíz	Total	Tallo	Raíz	Total
N mineral	ns	ns	ns	0.80** 0.002	ns	ns
NO_3^-	0.61* 0.046	ns	ns	0.86** 0.0006	0.64* 0.03	0.81** 0.002
C (%)	0.76** 0.006	0.59 0.05	0.69* 0.018	0.78** 0.003	0.73* 0.01	0.80** 0.002
N total (%)	0.81** 0.002	0.83** 0.001	0.80** 0.002	ns	0.82** 0.002	0.69* 0.018
C : N	-0.75** 0.007	-0.87** 0.0005	-0.79** 0.004	ns	-0.77** 0.0059	ns
pH (H ₂ O)	ns	ns	ns	0.72* 0.01	ns	ns
N potencialmente mineralizable	0.63* 0.03	ns	ns	0.94** <.0001	0.60 0.05	0.85** 0.008

* = significativo al 5% <0.05

** = significativo al 1% <0.01

Considerando solamente el sitio de San Pedro, la producción de biomasa del maíz no tuvo correlaciones con las características químicas del suelo (Cuadro 20). Sin embargo tuvo buenas correlaciones con las variables de calidad de los residuos de árboles de sombra, en particular la concentración de N en las raíces y el N liberado por las raíces. Hubo menos correlación con las características de las hojas. Eso puede ser debido al comportamiento de la *Inga* sp que liberó más N en los residuos de raíces que a partir de la hojarasca. La extracción de N por el maíz fue bien correlacionada con el N potencialmente disponible, el contenido inicial de NO_3^- del suelo y con el N liberado por las raíces de árboles (Cuadro 20). En este estudio se ve que la especie de árbol que influye directamente sobre la disponibilidad de N en el suelo tiene también efecto sobre la producción de maíz. En Verde Vigor se encontró una fuerte relación del pH del suelo ($r = -0.98$, $P = 0.01$) con la producción de biomasa de raíz del maíz.

Cuadro 20. Correlaciones entre la biomasa, el contenido de N en maíz y las características químicas del suelo y la calidad de los residuos de árboles en suelos provenientes de San Pedro

Variables	Materia seca en g planta ⁻¹			Contenido de nitrógeno en mg N planta ⁻¹		
	Tallo	Raíz	Total	Tallo	Raíz	Total
San Pedro						
NO_3^-	<i>ns</i>	<i>ns</i>	<i>ns</i>	0.87	0.93*	0.91*
				0.052	0.022	0.029
N mineral	<i>ns</i>	<i>ns</i>	<i>ns</i>	<i>ns</i>	<i>ns</i>	<i>ns</i>
Nitrógeno en hojas de árboles	<i>ns</i>	0.95*	<i>ns</i>	<i>ns</i>	<i>ns</i>	<i>ns</i>
		0.01				
Nitrógeno en raíces de árboles	0.95*	0.99**	0.93*	<i>ns</i>	<i>ns</i>	<i>ns</i>
	0.01	0.001	0.018			
Nmin liberado en hojas de árboles	<i>ns</i>	0.90*	<i>ns</i>	<i>ns</i>	<i>ns</i>	<i>ns</i>
		0.03				
Nmin liberado en raíces de árboles	0.93*	<i>ns</i>	0.92*	0.89*	0.95*	0.94*
	0.02		0.02	0.03	0.01	0.01
N potencialmente mineralizable	<i>ns</i>	0.95*	<i>ns</i>	0.87	0.93*	0.91*
		0.01		0.05	0.01	0.02

* = significativo al 5% <0.05

** = significativo al 1% <0.01

5. - CONCLUSIONES

- Respecto a los maderables *Terminalia ivorensis*, *Terminalia amazonia* y *Eucalyptus deglupta*, las leguminosas *Inga sp* y *Erythrina poeppigiana* presentaron tasas más altas de liberación de N por sus residuos (hojas ó raíces) e influenciaron positivamente el contenido de nitratos del suelo y el N potencialmente disponible del suelo, así como la producción de biomasa y la extracción de N por el maíz cultivado en invernadero
- La extracción de N por la planta de maíz cultivada en invernadero estuvo relacionada con las variables del suelo influenciadas por las especies arbóreas: NO_3^- inicial del suelo y N potencialmente mineralizable
- Respecto a la calidad de los residuos de árboles (hoja, hojarasca, raíces) el contenido de N y la tasa de liberación de N por las raíces obtuvieron mejores correlaciones con la producción de biomasa del maíz cultivado en invernadero que las características de la hojarasca
- Mientras que la liberación de N por la hojarasca de *Inga sp* no fue más alta que la de los maderables, sus raíces obtuvieron la tasa de liberación de N más alta de todas las especies, inclusive *E. poeppigiana*
- El método de incubación aeróbica de suelos en laboratorio a 28 °C utilizando suelo humedecido a niveles de humedad alta (capacidad de campo y 80% de la capacidad de campo) no permitió medir la tasa de mineralización del nitrógeno del suelo. Ocurrió pérdida de N mineral (mineralización negativa) que siguió el curso de la humedad, es decir, con un nivel de humedad más alto fue más rápida la pérdida
- La emisión de N_2O durante la incubación aeróbica fue alta. Con el nivel de humedad a capacidad de campo, los suelos perdieron la totalidad de su contenido de N mineral en forma de N_2O dentro de unas horas o unos días. Entonces el proceso de desnitrificación puede ser muy activo y rápido en esos suelos

6. - RECOMENDACIONES

- En este tipo de suelo, las pruebas de incubación del suelo llevadas a cabo directamente en el campo permitirán los procesos de humectación y desecación, lo que debe ser más adecuados para evaluar la tasa de mineralización del N que en incubación en laboratorio a humedad constante

- La producción de biomasa y la extracción de N por el maíz cultivado en invernadero, así como el contenido de NO_3^- inicial en el suelo y el N potencialmente mineralizable pueden ser utilizados como indicadores de efecto de especie de árboles sobre la disponibilidad del N en el suelo
- Dado que el proceso de emisión de N_2O puede ser muy alto, se justifica estudios complementarios para mejorar nuestro entendimiento de estos procesos biológicos que contribuyen a esta emisión
- La alta tasa de liberación de N por las raíces de *Inga* sp amerita estudios complementarios sobre el ciclo de N en sistemas con *Inga* sp

7- REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS



- Aarnio, T., y Martikainen 1995. Mineralization of C and nitrification in scots pine forest soil treated with nitrogen fertilizers containing different proportions of urea and its slow-releasing derivative, urea formaldehyde. *Soil Biol. Biochem.* (27) 10, P1325-1331.
- Adams, M.A. y Attiwill, P.M. 1986. Nutrient cycling and nitrogen mineralization in eucalypt forest of south-eastern Australia. *Plant and Soil* 92, 341-362
- Alvarado, A. 2001. Apuntes de clase del Curso Silvicultura de plantaciones. Características Taxonómicas del suelo. Turrialba, Costa Rica. 24 p
- Aguiar, ACF. 2001. Efecto de especies usadas como abono verde en el enriquecimiento de la fertilidad del suelo y en el manejo de plagas. Tesis Mag. Sc., CATIE, Turrialba, Costa Rica. 93 p
- Anderson, M.J. e Ingram, J.M. 1993. *Tropical soil Biology and Fertility. A Handbook of Methods*. 2da edit. C.A.B. International. 215 p
- Babbar, L.J. y Zak, D.R. 1993. Nitrogen cycling in coffee agroecosystems: Net mineralization and nitrification in the presence and absence of shade trees. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 48 P 107-113.
- _____ y Zak, D. R. 1995. Nitrogen loss from coffee agroecosystems in Costa Rica: Leaching and denitrification in the presence and absence of shade trees. *J. Environ. Qual.* (24): 227-223.
- Barton, L.; McLay, C.D.A.; Schipper, L.A. y Smith, T. 1999. Annual denitrification rates in agricultural and forest soils: A review. *Aust. J. Soil Res.*, 37 1073-93
- Beer, J. 1988. Litter production and nutrient cycling in coffee (*Coffea arabica*) or cacao (*Theobroma cacao*) plantations with shade trees. *Agroforestry Systems* 7: 103 – 114
- Bertsch H., F. 1998. La fertilidad de los suelos y su manejo. San José, C. R. 157p
- Bornemisza, E. et al, 1979. Organic Carbon Determination by the Walkly Black and dry combustion methods insurface soils and andept profiles from Costa Rica. *Soil Sci Soc. Amer Jour* 43:78-83.
- _____ 1982. Nitrogen cycling in coffe plantations. *Plant and Soil* 67, 241-246.
- Bremner, J.M. 1996. Nitrogen-total. In Sparks et al., eds. *Methods of Soil Analysis, Part 3: Chemical Methods*, p 1085-1121. Soil Science Society of America, Book Series 3: Madison, EU
- Briceño J y Pacheco R. 1984. Métodos Analíticos para el estudio de Suelos y Plantas. Editorial de la Universidad de Costa Rica, San José. pp 25-26

- Boswell, F C.; Meisinger, J. J.; Case, N.L. 1985 Production, marketing and use of nitrogen fertilizers
In Fertilizer technology and use Ed by O.P Engelstad 3 ed. Madison, Wis. SSSA P 229-292
- Cahn, M.D.; Bouldin, D.R. y Cravo, M.S. 1992 Nitrate sorption in the profile of an acid soil Plant
and Soil 143: 179-183
- Carvajal, J.F. 1984 Cafeto: cultivo y fertilización. Berna, Suiza, Instituto de la potasa
- Clausnitzer, I. 1988 Mineralización del Nitrógeno en suelos de algunas formaciones vegetales del
Noroeste de Venezuela Turrialba (38) 3 pp 223-229
- Corey, R.B. 1990. Physical-Chemical Aspects of nutrient availability In: Soil Testing and plant
analysis 3era ed p 11-24
- Costa FJSA; Bouldin, D.R. y Suhet, A.R. 1990 Evaluation of N recovery from mucuna placed on the
surface or incorporated in a Brazilian Oxisol Plant and Soil 124: 91-96
- Davidson, E.A., 1991. Fluxes of nitrous oxide and nitric oxide from terrestrial ecosystems. In: Rogers,
J.E., Whitman, W.B (Eds.), Microbial Production and Consumption of Greenhouse Gases:
Methane, Nitrogen Oxides and Halomethanes. Am. Soc. Microbiol., Washington, DC, pp 219-
235
- Días, R. R. and Hunter, A. 1978 Metodología de muestreo de suelos, análisis químico de suelos y
tejido vegetal e investigación en invernadero. Turrialba, Costa Rica, CATIE, Proyecto
centroamericano de fertilidad de suelos 62 p.
- Douglas and Magdoff 1991 An evaluation of nitrogen mineralization indices for organic residues
Journal of Environmental Quality 20:372 - 386
- Fassbender, H. W. y Bornemisza, E. 1987 Química de suelos con énfasis en suelos de América
Latina. Colección de libros y materiales educativos no 81, IICA San José, Costa Rica 420 p
- _____ 1993. Modelos edafológicos de sistemas agroforestales. 2da ed Turrialba Costa
Rica. Serie de materiales de enseñanzas (29) 491 p.
- Forsythe, W. 1985. Física de Suelos: Manual de Laboratorio. 1ª edición, 2ª reimpresión San José:
IICA
- George, M. and Varghese, G. 1990. Nutrient cycling in *Eucalyptus globulus* plantation II. Litter
production and nutrients return. Indian Forester Vol 116 (12) : 962-968.

- Harmand, J.H.; Ndonfack, P y Njiti F C (2002). Efectos de varias especies de árboles sobre el estrato herbáceo y la dinámica del nitrógeno del suelo en la zona Sudanesa de Camerún. *Agroforesteria en la Américas* 9 (33-34) : 14-18.
- Handayanto, E.; Cadisch, G. and Giller, K.E 1995 Manipulation of quality and mineralization of tropical legume tree prunings by varying nitrogen supply. *Plant and Soil* 176: 149-160
- Heal, O W ; Anderson, J.M and Swift, M.J 1997 Plant litter quality and decomposition: an historical overview In: Cadisch G, Giller, K.E (eds). *Driven by Nature*. CAB International, Walling-ford, UK, pp 3-30
- Holdridge, L. R. 1967. *Life zone ecology*. Tropical Science Center San José, Costa Rica. 207 p
- ICAFFE (Instituto del Café de Costa Rica) 1999 *Manual de recomendaciones para el cultivo del café Costa Rica*. 194 p
- Jones, J.B and Case V. 1990 *Soil Testing and Plant Analysis*. SSSA Book Series 3 3rd Ed Wisconsin: p 414
- Kass D C L. 1996. *Fertilidad de suelos*. 1 ed. San José, C. R. EUNED. 272 p.
- Knoepp, J. D and Swank, W. T. 1995. Comparison of available soil nitrogen assays in control and burned forested sites. *Soil Science Society American Journal*. 59: 1750 – 1754
- Li, Z A; Peng, S L; Rae, D. J;& Zhou, G Y. 2001. Litter decomposition and nitrogen mineralization of soils in subtropical plantation forest of Southern China, with special attention to comparisons between legumes and non legumes. *Plant and Soil* 229: 105-116
- Linden, B.; Lyngstad, I.; Sippola, J.; Dissing N, J; Soegaard, K.; Kjellerup, V. 1993. Evaluation of the ability of three laboratory methods to estimate net nitrogen mineralization during the growing season. *Swedish Journal Agricultural Res* 23: 161 – 170.
- Mafongoya, P.L.; Dzwela, B.H; Nair, P K 1997 Effect of multipurpose trees, age of cutting and drying method on pruning quality In: Cadisch G, Giller, K.E (eds) *Driven by Nature: Plant litter quality and decomposition*. CAB International, Walling-ford, UK, pp 167-174.
- _____; Barak, P.; Reed, J.D. 2000. Carbon, nitrogen and phosphorus mineralization of Tree leaves and manure. *Biol Fertil Soils* (30), pp 298-305.
- Matson, P.A and Vitousek, P.M. 1981 Nitrogen mineralisation and nitrification potentials following clearcutting in the Hoosier National Forest, Indiana. *Forest Science* 27:781-791

- Mogollón, J. P.; Miragaya, G. J.; Sánchez, L. F.; Chacón, N. Y. Araujo, J. 1997. Nitrogeno potencialmente disponible en suelos de cafetales bajo diferentes árboles de sombra. *Agronomía Tropical* 47 (1): 87-102.
- Montagnini, F. y Buschbacher, R. 1989. Nitrification rates in two undisturbed tropical rain forests and three slash-and-burn sites of the Venezuela Amazon. *Biotropica* 21 (1): 9-14
- _____ y Sancho, F. 1993. Reciclaje de nutrientes en plantaciones jóvenes con árboles nativos: estrategias para un manejo sustentable. *YVYRARETA* 4(4): 9-23
- _____; Jordan, C.F.; Machado, M. R. 1999. Reciclaje y eficiencia en el uso de nutrientes en sistemas agroforestales. *YVYRARETA* 9: 21-40
- Montgomery, D.C. 1991. *Diseño y Análisis de Experimentos*. Trad. J.D. Saldivar. Grupo Editorial Iberoamérica S.A. de C.V. México. 589 p.
- Morales, E. and Beer, J. 1987. Distribución de raíces finas de *Coffea arabica* y *Eucalyptus deglupta* en cafetales del Valle Central de Costa Rica. *Agroforestería en las Américas* 5 (15-18): 44-48.
- Munevar, F. 1983. Principales procesos microbiológicos en el suelo y su función en la productividad agropecuaria. *Suelos Ecuatoriales* 13 (2): 1-17
- Munsell Soil Color Charts 1971. Munsell Color Company, INC. Baltimore, Maryland 21218 U.S.A. 20p.
- Nelson, D. W. y L.E. Sommers 1996. Total carbon, organic carbon, and Organic matter. In Sparks et al., eds. *Methods of Soil Analysis, Part 3: Chemical Methods*, p. 961-1010. Soil Science Society of America, Book Series 3: Madison, EU
- Palm, C. A. y Sánchez, P. A. 1990. Decomposition and nutrient release patterns of the leaves of three legumes. *Biotropica*, 22(4): 330-338.
- Palm, C.A. y Sánchez, P.A. 1991. Nitrogen release from the leaves of some tropical legumes as affected by their lignin and polyphenolic contents. *Soil Biol. Biochem.* 23 (1): 83-88.
- _____. 1995. Contribution of agroforestry trees to nutrient requirements of intercropped plants. *Agroforestry Systems*. 30: 105-124
- Rendero D., R.V. 2001. Efecto de sistemas agroforestales con café sobre la contaminación del agua con nitrato en microcuencas de la zona sur de Costa Rica. Tesis M.Sc. CATIE. Turrialba, Costa Rica. 50 p.

- Rivero, C 1999. Materia orgánica del suelo Alcance (57) Universidad Central de Venezuela. Facultad de Agronomía Maracay-Venezuela 211p
- Robertson, G.P.; Herrera, R.; Rosswall, T. 1982 Nitrogen Cycling in Ecosystems of Latin America and the Caribbean 430 p.
- _____ y Tiedje, J. M. 1987 Nitrous oxide sources in aerobic soil: Nitrification, denitrification, and other biological processes Soil Biol Biochem 19: 187-191
- Russel, W. 1976 Soil condition and plant Growth. 10 ed Hong Kong 849 p
- Sánchez, S. A. 1994. Crecimiento de *Eucalyptus deglupta* y *E. grandis* bajo tres sistemas de plantación a nivel de finca, en la zona de Turrialba, Costa Rica. Tesis Mag Sc CATIE. Turrialba, Costa Rica 95 p
- SAS Institute 1999 SAS/STAT User's guide Versión 8 (1 S-MO). SAS Institute Cary, N.C USA
- Singh, K.; Chauhan, H. S.; Rajput, D.K.; Singh, D.V. 1989 Report of a 60 month study on litter production, changes in soil chemical properties and productivity under Poplar (*P. deltoides*) and Eucalyptus (*E. hybrid*) interplanted with aromatic grasses Agroforestry Systems, 9: 37 – 45
- 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
- Steel, R.G.D. y Torrie, J.H. 1988. Bioestadística, principios y procedimientos. Trad R. Martínez B 2da ed México 622p
- Szott, L.T.; Fernandez, E.C.M. y Sánchez P.A. 1991. Soil-Plant interactions in agroforestry systems Forest Ecology and Management 45: 127-152.
- Tavares, C.F.; Beer, J.; Jiménez, F.; Schroth, G.; Fonseca, C. 1999. Experiencia de agricultores de Costa Rica con la introducción de árboles maderables en plantaciones de café Agroforestería en las América 6 (23) : 17 –20.
- Vaast, P. 2001 Resumen en posters en el área de Agroforestería Tropical (CATIE) Ventajas y desventajas de los árboles de sombra en sistemas con café
- _____ y Harmand, J. M. 2002. Importance des systèmes agroforestiers dans la production de café en Amérique centrale et au Mexique Recherche et caféiculture 35-40
- Vargas, R.; Richter, J.S. and Bornemisza, E. 1994. Environmental Impacts of nitrification and nitrate adsorption in fertilized Andisols in the Valle Central de Costa Rica. Soil Science Soil Biol Biochem. (157) 5, P 289-299

Vilas, B O 1990 Descomposición de hojarasca y mineralización del nitrógeno de la materia orgánica del suelo bajo cuatro sistemas agroforestales, en Turrialba, Costa Rica Thesis M Sc. CATIE 152 p.

8 - ANEXOS

Anexo I. Resultados estadísticos de los tratamientos por sitio e interacciones para un diseño con efecto anidado y por especie en cada sitio sobre las características de los suelos en los tres sitios

Diseño de bloques completos al azar con efecto anidado

Sitio	pH H ₂ O	Humedad de campo(%)	N(%)	Materia Orgánica (%)	C:N	C (%)
Verde Vigor	5.59 b	51.6 a	0.25 c	7.13 b	16.4 a	4.13 b
Santa Fe	6.72 a	53.9 a	0.40 b	10.1 a	14.5 b	5.86 a
San Pedro	5.42 b	41.7 b	0.50 a	9.24 a	10.7 c	5.36 a
Pr > F	<0.0001	<0.0001	<0.0001	0.0006	<0.0001	0.0006

Especie (Sitio)

Pr > F	0.93		0.12	0.50	0.89	0.50
------------------	-------------	--	-------------	-------------	-------------	-------------

Finca Verde Vigor (Diseño de bloques completos al azar)

<i>E. deglupta</i>	5.56 a	58.8 a	0.25 a	7.23 a	16.13 a	4.19 a
<i>E. poeppigiana</i>	5.63 a	50.8 a	0.27 a	7.90 a	16.53 a	4.56 a
<i>T. ivorensis</i>	5.56 a	50.2 a	0.22 a	6.26 a	15.7 a	3.62 a
Pleno Sol	5.60 a	51.6 a	0.25 a	7.13 a	16.1 a	4.13 a
Pr > F	0.98	0.81	0.79	0.81	0.92	0.82

Finca San Pedro

<i>E. deglupta</i>	5.43 a	39.6 a	0.44 b	8.33 bc	10.8 a	4.82 b
<i>E. poeppigiana</i>	5.43 a	42.7 a	0.45 b	8.06 bc	10.67 a	4.79 b
<i>Inga</i> sp	5.36 a	43.1 a	0.51 ab	9.86 b	11.07 a	5.71 ab
<i>T. ivorensis</i>	5.46 a	39.4 a	0.57 a	10.53 a	10.58 a	6.11 a
<i>T. amazonia</i>	5.43 a	43.8 a	0.52 ab	9.20 abc	10.32 a	5.34 ab
Pr > F	0.96	0.34	0.034	0.032	0.28	0.032

Finca Santa Fe

<i>E. deglupta</i>	6.60 a	59.33 a	0.41 a	10.43 a	14.78 a	6.01 a
Pleno Sol	6.87 a	48.533	0.40 a	9.76 a	14.25 a	5.67 a
Pr > t	0.053	0.0089	0.79	0.19	0.17	0.18

Los promedios seguidos por una misma letra no difieren estadísticamente ($P > F = 0.05$) y ($P > t = 0.05$)

Anexo 2 - Nitrógeno mineralizado acumulado y tasas de pérdidas durante la incubación aeróbica "in vitro" bajo los diferentes tratamientos en estado más humedo

Especies	N mineral inicial	NO ₃ ⁻ (inicial)	Tasa de pérdidas de N mineral (7 días)	Tasa de pérdidas de N mineral (28 días)	Humedad (%)
San Pedro					
<i>E. deglupta</i>	11.00 b	10.0 b	-0.91 a	-0.35 a	39.6 a
<i>E. poeppigiana</i>	17.0 ab	15.3 b	-1.7 a	-0.58 a	42.7 a
<i>Inga</i> sp.	20.0 a	18.0 a	-2.0 a	-0.68 a	43.1 a
<i>T. ivorensis</i>	9.9 b	9.6 b	-0.98 a	-0.33 a	39.5 a
<i>T. amazonia</i>	14.00 ab	9.7 b	-1.6 a	-0.45 a	43.8 a
Pr > F	0.07	0.02	0.23	0.05	0.34
Santa Fe					
<i>E. deglupta</i>	17.7 a	16.3 b	-1.15 a	-0.56 a	59.3 a
Café a Pleno sol	42.2 a	41.7 a	-4.7 a	-1.47 a	48.5 b
Pr > t	0.06	0.01	0.05	0.06	0.01
Verde Vigor					
<i>E. deglupta</i>	7.8 a	6.03 a	-0.28 a	-0.25 a	53.9 a
<i>E. poeppigiana</i>	11.8 a	9.6 a	-0.61 a	-0.39 a	50.8 a
<i>T. ivorensis</i>	9.7 a	5.17 a	-0.63 a	-0.33 a	50.2 a
Café a Pleno sol	15.3 a	7.5 a	-0.28 a	-0.50 a	51.6 a
Pr > F	0.22	0.13	0.29	0.28	0.08

Los valores seguidos por la misma letra no son significativamente diferentes a una Pr < 0.05.

Anexo 3 - Nitrógeno mineralizado acumulado y tasas de pérdidas durante la incubación aeróbica *in vitro* bajo los diferentes tratamientos en estado menos húmedo

Especies	Nmin inicial	NO ₃ ⁻ (inicial)	Tasa de pérdidas de Nmin (7 días)	Tasa de pérdidas de Nmin (35 días)	Humedad (%)
San Pedro					
<i>E. deglupta</i>	11.00 b	10.0 b	-0.48 a	-0.3 c	22.9 a
<i>E. poeppigiana</i>	17.0 ab	15.3 b	-1.2 a	-0.53 ab	28.3 a
<i>Inga</i> sp	20.0 a	18.0 a	-1.44 a	-0.61 a	26.5 a
<i>T. ivorensis</i>	9.9 b	9.6 b	-0.77 a	-0.22 c	26.9 a
<i>T. amazonia</i>	14.00 ab	9.7 b	-0.31 a	-0.38 bc	28.6 a
Pr > F	0.07	0.02	0.34	0.01	0.25
Santa Fe					
<i>E. deglupta</i>	17.7 a	16.3 b	-0.86 a	-0.49 a	39.17 a
Café a Pleno sol	42.2 a	41.7 a	-2.4 a	-1.06 a	32.6 a
Pr > t	0.06	0.01	0.33	0.07	0.22
Verde Vigor					
<i>E. deglupta</i>	7.8 a	6.03 a	-0.65 a	-0.20 a	35.07 a
<i>E. poeppigiana</i>	11.8 a	9.6 a	-0.20 a	-0.19 a	31.8 a
<i>T. ivorensis</i>	9.7 a	5.17 a	-0.11 a	-0.20 a	33.2 a
Café a Pleno sol	15.3 a	7.5 a	-0.07 a	-0.44 a	34.2 a
Pr > F	0.22	0.13	0.63	0.13	0.87

Los valores seguidos por la misma letra no son significativamente diferentes a una Pr < 0.05

Anexo 4 Porcentajes de perdidas del contenido de N mineral inicial en los diferentes tratamientos bajo dos condiciones de humedad

Humedad	Sitio	Tratamiento	N ₂ O Promedio	Humedad %	Perdidas de N mineral inicial (%)		
A Capacidad de - Campo	Verde Vigor	<i>E deglupta</i>	0 018	56 10	0 23		
		<i>T ivorensis</i>	0 048	55 79	0 49		
		<i>E poeppigiana</i>	0 021	56 56	0 18		
	Santa Fe	Pleno Sol	0 011	56 88	0 07		
		<i>E deglupta</i>	1 889	64 33	10 63		
		Pleno Sol	1 177	62 70	2 79		
		<i>E deglupta</i>	5 646	47 79	51 22		
		<i>E poeppigiana</i>	5 543	47 33	32 58		
		San Pedro	<i>Inga spp</i>	5 005	47 91	24 96	
			<i>T ivorensis</i>	1 538	48 10	15 54	
			<i>T amazonia</i>	3 140	48 02	22 40	
		Verde Vigor	<i>E deglupta</i>	-0 001	39 95	-0 01	
			<i>T ivorensis</i>	-0 004	39 67	-0 04	
			<i>E poeppigiana</i>	0 011	40 36	0 10	
			Pleno Sol	0 055	40 65	0 36	
			<i>E deglupta</i>	0 006	47 90	0 03	
			80 % de Capacidad de Campo	Santa Fe	Pleno Sol	0 001	46 43
		<i>E deglupta</i>			0 007	31 95	0 06
<i>E poeppigiana</i>	0 000	31 55			0 00		
San Pedro	<i>Inga sp</i>	0 008		32 07	0 04		
	<i>T ivorensis</i>	-0 001		32 23	-0 01		
	<i>T amazonia</i>	0 003		32 16	0 02		

Anexo5.- Resultados estadísticos de la materia seca de maíz (g planta⁻¹) correspondiente a cada una de la especie (Sitio)

(Diseño de bloques completos al azar)

Especie	Peso seco hoja (g planta ⁻¹)	Peso seco de raíz (g planta ⁻¹)	Peso seco total
Finca Verde Vigor			
<i>E. deglupta</i>	1.326 a	1.427 a	2.754 a
<i>E. poeppigiana</i>	1.916 a	1.634 a	3.550 a
<i>T. ivorensis</i>	1.703 a	1.407 a	3.110 a
Pleno sol	1.746 a	1.549 a	3.295 a
Pr > F	0.362	0.653	0.497
Finca San Pedro			
<i>E. deglupta</i>	3.553 ab	2.837 b	6.390 b
<i>E. poeppigiana</i>	4.334 a	4.207 a	8.541 a
<i>Inga</i> sp	3.915 ab	3.347 b	7.262 ab
<i>T. ivorensis</i>	3.393 b	2.988 b	6.382 b
<i>T. amazonia</i>	3.364 b	2.757 b	6.122 b
Pr > F	0.132	0.006	0.021
Finca Santa Fe			
<i>E. deglupta</i>	3.748 a	2.355 a	6.103 a
Pleno sol	4.072 a	2.758 a	6.830 a
Pr > t	0.341	0.213	0.283

Los promedios seguidos por una misma letra no difieren estadísticamente (P=0.05).