

CENTRO AGRONOMICO TROPICAL DE
INVESTIGACION Y ENSEÑANZA
PROGRAMA DE ENSEÑANZA
AREA DE POSTGRADO

EROSION HIDRICA, LIXIVIACION Y
BALANCE DE N, P, K, Ca Y Mg, EN UNA
ROTACION FRIJOL - MAIZ CON PRACTICAS AGRONOMICAS
DE CONSERVACION DE SUELOS, EN TIERRAS DE LADERA,
TURRIALBA, COSTA RICA

*Tesis sometida a la consideración del Comité
Técnico Académico del Programa de Estudios
de Posgrado en Ciencias Agrícolas y
Recursos Naturales del Centro
Agronómico Tropical de Investigación
y Enseñanza, para optar al grado de*

Magister Scientiae

Por

ALEX LAZARO TINEO BERMUDEZ

CATIE

Turrialba, Costa Rica

1993

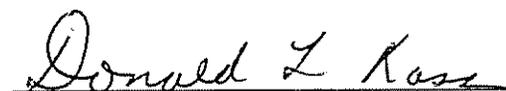
Esta tesis ha sido aceptada en su presente forma, por la Jefatura del Area de Postgrado en Ciencias Agrícolas y Recursos Naturales del CATIE y aprobada por el Comité Asesor del estudiante como requisito parcial para optar al grado de:

MAGISTER SCIENTIAE

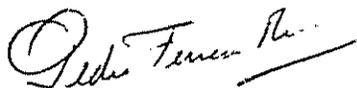
FIRMANTES:



Jorge Faustino
Profesor Consejero



Donald Kass
Miembro Comité Asesor



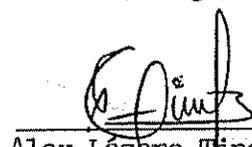
Pedro Ferreira
Miembro Comité Asesor



Assefaw Tewelde
Jefe, Area de Postgrado



Ramón Lastra
Director, Programa de Enseñanza



Alex Lázaro Tineo Bermúdez
Candidato

DEDICATORIA

A mis padres : Aurelio y Clara

A mi esposa : María Isabel

A mis hermanos : Betty, Ruth, Miguel Angel,
Rosana, Nancy, y Polita

A mi Maestro : Ing. Roberto Ibáñez Agüero

A mi pueblo : Ayacucho

AGRADECIMIENTOS

Al CATIE y a la ODA del Gobierno de Gran Bretaña por haberme brindado la oportunidad para hacer realidad este anhelo, mis estudios de Maestría.

A mi consejero, Profesor Jorge Faustino Manco, por su paciencia, sus consejos y colaboración, fundamentales para la realización de esta tesis.

A los miembros de mi comite, Doctores Donal Kass y Pedro Ferreira, por su atención prestada y sus sugerencias en el desarrollo de la tesis.

A mi amigo y colega Ing. Javier Antonio Espiritu. Gracias a su ayuda hice realidad mi viaje al CATIE.

A mi profesor y colega, Ing. Guido Tenorio; a mi colegas, Ing. Raúl Palomino, Sr. Jorge Gutiérrez, Ing. Juan Girón, Ing. Marhleri Cerda. Ellos se recargaron con mis labores durante mi ausencia.

A mis compañeros de la Promoción 91-93. La amistad que me brindaron fue fundamental para el éxito de esta tarea.

A la Gran Familia Arze, Don Pepe, Doña Marujita y sus hijos; Son un ejemplo para todos los que tuvimos la suerte de conocerlos. Que Dios los bendiga siempre.

Al personal Técnico, Administrativo y de Servicios de los proyectos RENARM/Manejo de Cuencas, y AFN/SAREC, por todo el apoyo que me brindaron durante la ejecución de mi Trabajo de Tesis.

Al personal, del laboratorio de suelos: Mario Jiménez, Carlos Fernández, Patricia Leandro, Carlos Castillo, y del Centro de Cómputo: Gustavo López, Yony Pérez. Su ayuda fue valiosa.

A la comunidad peruana, residentes en el CATIE, Danilo Pezo, José Arze, Jorge Faustino, Pío Carrera. La amistad y confianza que me brindaron desde mi llegada a esta institución, me permitieron desenvolverse mejor.

A la comunidad turrialbena, y en especial a mis amigos Carlos León y Deyanira, Tomás Rojas y Liseth, Luis Meléndez y Xinia. Fueron muy buenos anfitriones.

A todas las personas que con su apoyo directo o indirecto contribuyeron en mi formación profesional. Si los citara no terminaría; los llevo en mi corazón.

BIOGRAFIA

El autor nació el 11 de febrero de 1962 en la ciudad de Ayacucho, Perú.

Realizó sus estudios primarios en la escuela Pre-vocacional de varones n° 611 "Luis Carranza" y los secundarios en la Gran Unidad Escolar "Mariscal Cáceres", en su ciudad natal.

En 1979 ingresó a la Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga (UNSCH), en donde se graduó como Bachiller en Ciencias Agrícolas en julio de 1985, y como Ingeniero Agrónomo en octubre de 1987.

Su labor profesional, hasta la fecha, lo realizó impartiendo principalmente la cátedra de Suelos en la Facultad de Ciencias Agrarias de la UNSCH, en la que se inició como Ayudante de Cátedra siendo aún estudiante; Posteriormente pasa a ser Jefe de Prácticas y actualmente labora como Profesor Auxiliar a dedicación exclusiva.

Desde diciembre de 1990 coordina e imparte cursos de capacitación sobre crianza y manejo de lombrices de tierra con fines agrícolas, los mismos que se realizaron en algunas ciudades del Perú.

En setiembre de 1991 ingresa al Programa de Maestría del CATIE, en Turrialba Costa Rica, donde se graduó como Magister Scientae en la especialidad de Manejo Integrado de Recursos Naturales con énfasis en Manejo de Cuencas Hidrográficas.

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN	viii
SUMMARY	x
LISTA DE CUADROS	xii
ANEXOS	xiii
LISTA DE FIGURAS	xiv
I. INTRODUCCION	1
Objetivo general	2
Objetivos específicos	2
II. REVISION DE LITERATURA	4
2.1 La erosión hídrica	4
2.1.1 Definición de erosión	4
2.1.2 Clases de erosión y su importancia.	5
Erosión geológica o natural	5
Erosión acelerada o antrópica.	6
2.1.3 El proceso de la erosión hídrica	7
2.2 Factores de la erosión hídrica	9
2.2.1 Lluvia	11
2.2.2 Suelo	15
2.3 Cobertura vegetal e importancia	17
2.4 La Ecuación Universal de Pérdida de Suelos (EUPS)	20
2.5 Indices de erosividad	22
El índice EI30	22
El índice KE>1	22
2.6 Tolerancia de pérdida de suelos	23
2.7 Balance hídrico y fenómenos asociados al proceso	24
2.7.1 Principio general	24
2.7.2 Percolación del agua y lixiviación de nutrimentos	25
2.7.3 Evapotranspiración	27
2.8 Suelos volcánicos, características y manejo	28
III. MATERIALES Y METODOS	32
3.1 Características del área de estudio.	32
Ubicación	32
Clima	32
Suelo	32
Historia	35
3.2 Descripción del experimento	36
Parcelas de escorrentía	36
Diseño experimental y tratamientos.	38
Conducción del experimento	36

3.3	Variables y metodología para la toma de datos	48
	Rendimiento de los cultivos	48
	Pérdida de suelos y nutrimentos por erosión.	50
	Pérdida de nutrimentos por escorrentía . . .	51
	Pérdida de nutrimentos por lixiviación . . .	52
	Balance de nutrimentos	54
	Precipitación y escorrentía	55
	Estudio de algunos índices de erosión. . . .	55
3.4	Procedimientos analíticos	57
IV.	RESULTADOS Y DISCUSION	60
4.1	Balance hídrico	60
	Precipitación	60
	Evapotranspiración	60
	Escorrentía y pérdida de nutrimentos por	
	escorrentía	62
	Percolación y pérdida de nutrimentos por	
	lixiviación	64
4.2	Rendimiento de los cultivos	67
	4.2.1 Rendimientos de frijol.	67
	4.2.2 Rendimientos de maíz	70
4.3	Extracción de nutrimentos del suelo, por los	
	cultivos	73
	4.3.1 Extracción de nutrimentos por el frijol	73
	Nitrógeno	73
	Fósforo	78
	Potasio	80
	Calcio	82
	Magnesio.	84
	4.3.2 Extracción de nutrimentos por el maíz.	86
	Nitrógeno	86
	Fósforo	86
	Potasio	88
	Calcio	91
	Magnesio.	93
4.4	Balance de nutrimentos	95
	Balance de Nitrógeno	95
	Balance de Fósforo	95
	Balance de Potasio	95
	Balance de Calcio	95
	Balance de Magnesio.	96
4.5	Pérdida de suelos e índices de erosión. . . .	97
	4.5.1 Pérdida de suelos por erosión	97
	4.5.2 Índices de erosión	99
V.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	101
	Conclusiones.	101
	Recomendaciones.	102
VI.	BIBLIOGRAFIA	104
VII.	ANEXOS	112

TINEO B., A. L. 1993. Erosión hídrica, lixiviación y balance de N, P, K, Ca y Mg, en una rotación frijol - maíz con prácticas agronómicas de conservación de suelos, en tierras de ladera, Turrialba, Costa Rica.

Palabras claves: lixiviación, erosión hídrica, escorrentía superficial, balance de nutrimentos, lisímetros, parcelas de escorrentía, cultivo en callejones, coberturas, rotación de cultivos, frijol, maíz, índices de erosividad.

RESUMEN

La pobre fertilidad y los problemas de manejo asociados con el mantenimiento y la mejora de suelo, son los principales problemas que se presentan en el uso eficaz de suelos tropicales ácidos para la producción agrícola. Todo mejoramiento de la fertilidad y productividad de estos suelos ácidos pobres por naturaleza es costoso, por lo que se hace necesario recurrir a técnicas simples de bajo costo y sostenibles.

Con el propósito de cuantificar las pérdidas de N, P, K, Ca y Mg, por los diferentes procesos hídricos (lixiviación, erosión hídrica y escorrentía superficial) y realizar un análisis de transferencia y balance de estos nutrimentos, entre octubre de 1992 y setiembre de 1993, se condujo un experimento en el Huerto Latinoamericano de Arboles Fijadores de Nitrógeno del CATIE, en San Juan Sur, Turrialba, Costa Rica.

Se utilizaron parcelas de escorrentía, dispuestas en un diseño de bloques completos al azar, sobre las que se instalaron los tratamientos siguientes: cultivo manejado tradicionalmente, cultivo en callejones de cuatro metros (CC-4m), cultivo en callejones de seis metros (CC-6m), cultivo con cobertura foliar de *Inga edulis* y cultivo con cobertura de *Erythrina fusca*. El cultivo se refiere a una rotación frijol - maíz iniciada en 1990. Asimismo, se mantuvo limpia y sin ninguna cobertura una parcela por bloque, con la finalidad de estudiar relaciones entre algunas características de la lluvia y la pérdida de suelos por erosión hídrica.

Cada parcela de escorrentía contó con un sistema colector constituido por una canoa para recolectar el suelo erosionado y una caja para medir la cantidad de agua escurrida. al centro de cada parcela se instalaron cápsulas lisimétricas a 70 cm de profundidad, para obtener muestras de solución de suelo conteniendo los nutrimentos lixiviados. En muestras de suelo, agua, y tejido vegetal, tomados oportunamente, se determinaron la composición de nutrimentos con los cuales se calcularon las pérdidas o movimientos de éstos en el sistema.

La pérdida de nutrimentos por los diversos procesos hídricos difieren significativamente entre ellos. Las pérdidas por lixiviación de N, P, K, Ca y Mg alcanzan hasta 108, 6, 65, 362 y 29 kg/ha respectivamente. En el caso del nitrógeno, la pérdida por lixiviación de este nutrimento es aproximadamente 80 veces mayor que el perdido por erosión; esta relación alcanza a 2000 veces para los casos de calcio, potasio y magnesio. El balance anual para cada nutrimento, en los tratamientos estudiados revela una tendencia a la disminución en las reservas año tras año, siendo más críticos los casos de calcio y magnesio. En el cultivo manejado tradicionalmente el balance para todos los nutrimentos siempre resultó negativo.

Los rendimientos (promedio de tres años) obtenidos por el frijol y maíz en los tratamientos con coberturas resultaron ser mejores a los cultivos en callejones. Así mismo, los rendimientos obtenidos en el primer y segundo año son superiores a los obtenidos en el tercer año.

Las pérdidas de suelo por erosión hídrica parecen no tener importancia mientras el suelo esté protegido con algún tipo de cobertura; Estas pérdidas alcanzaron en el periodo estudiado (1 año) hasta 694 kg/ha, y en promedio no pasan de 155 kg/ha. Sin embargo, la exposición de estos suelos al impacto directo de la lluvia puede ser muy grave puesto que las pérdidas registradas alcanzaron hasta 19.5 t/ha. Los análisis de regresión realizados señalan al modelo logarítmico como el mejor para predecir la erosión del suelo mediante los diferentes índices. Entre los índices que se estudiaron los que mejor resultaron fueron la intensidad máxima en 30 minutos (I_{30}) y el índice de Wischmeier modificado ($EI_{30 m}$).

Los resultados encontrados muestran la importancia que tienen las pérdidas de nutrimentos del suelo por el proceso de lixiviación, por lo que se recomienda ponerle especial atención en investigaciones futuras. Este fenómeno es típico en regiones tropicales húmedas, particularmente cuando se practica una agricultura intensiva; debido a la percolación, el agua provoca un reemplazo paulatino de las bases cambiables por iones H y Al conduciendo a la acidificación progresiva de estos suelos.

Con la finalidad de obtener resultados más confiables se recomienda para futuras investigaciones, realizar con mayor frecuencia muestreos del agua de escorrentía y del agua de infiltración, para determinar las variaciones en el contenido de nutrimentos según las fases de desarrollo del cultivo. Si bien los índices de erosividad I_{30} y $EI_{30 m}$ dieron buenos resultados, sería necesario realizar estudios para un período que comprenda por lo menos cinco años de registros, ya que los modelos obtenidos corresponden a solo un año de evaluación, y en suelos relativamente estables.

TINEO B., A.L. 1993. Hydric erosion, leaching and N, P, K, Ca and Mg balance in a bean-maize rotation with agricultural soil conservation practices, on hillsides, Turrialba, Costa Rica.

Key words: leaching, hydric erosion, surface runoff, nutrient balance, lisimeters, runoff plots, alley cropping, covers, crop rotation, beans, maize, erosion index.

SUMMARY

Poor fertility and management problems associated with soil maintenance and improvement, are they principal problems found in the effectual use of typical acid soils for agricultural production. Any improvement of fertility and productivity of these poor acid soils is expensive by nature, thus making it necessary to look for simple, low cost, sustainable techniques.

An experiment was conducted in CATIE's Latin American Grove of Nitrogen Fixing Trees in San Juan Sur, Turrialba, Costa Rica from October 1992 to September 1993 to quantify N, P, K, Ca and Mg losses during different hydric processes (leaching, hydric erosion and surface runoff) and analyze the transfer and balance of these nutrients.

Runoff plots used were arranged in a completely random block design. The following treatments were established on these plots: traditionally managed crop, crops in four meter alleys (CC-4m), crops in six meter alleys (CC-6m), crops with *Inga edulis* foliar cover, and crops with *Erythrina fusca* Lour cover. The crop refers to a bean-maize rotation begun in 1990. One plot per block was kept clear without any cover to study relationships between some rainfall characteristics and soil loss through hydric erosion.

Each runoff plot had a collection system with a receptacle to collect eroded soil and a box to measure the amount of runoff water. Lysimeter capsules were installed at a depth of 70 cm in the center of the plot to obtain soil solution samples containing leached nutrients. Nutrient composition was taken from soil, water and plant tissue samples to determine and calculate their losses and movements in the system.

Nutrient loss through diverse hydric processes differed significantly. N, P, K, Ca and Mg losses through leaching reached 108, 6, 65, 362 and 29 kg/ha, respectively. In the case of nitrogen, loss by leaching is approximately 80 times greater than loss by erosion; this relation reached 2000 times in the case of calcium, potassium and magnesium.

The annual balance for each nutrient, in the treatments studied, reveals a tendency for reserves to decrease year after year, with calcium and magnesium being the most critical. The balance for all nutrients was always negative in the traditionally managed crop.

Yields (averages of three years) obtained in beans and maize in treatments with mulches were better than those in alley cropping. First and second year yields were also superior to those obtained in the third year.

Soil losses due to hydric erosion seem to be unimportant while the soil is protected with some type of cover; losses reached during the period studied (1 year) were 694 kg/ha, with an average of not more than 155 kg/ha. However, the exposure of these soils to the rain's direct impact can be very great since registered losses reached 19.5 t/ha. Regression analyses conducted show the logarithmic model to be the best to predict soil erosion through different indices. Indices which showed the best results were maximum intensity in 30 minutes (I_{30}) and the modified Wischmeier index ($EI_{30\ m}$).

Results show the importance that soil nutrient loss through leaching can have, and thus the recommendation to pay special attention to future research. This phenomenon is typical in humid tropical regions, particularly where intensive agriculture is practiced. Due to percolation, water causes a gradual replacement of bases by H and Al ions bringing about a progressive acidification of these soils.

Further research is recommended to obtain more trustworthy results. Sampling of runoff water and infiltration water should be done more frequently to determine variations in nutrient content according to the crop's development phases. If the erosion indices I_{30} and $EI_{30\ m}$ give good results, it is still necessary to conduct studies for a record-keeping period of at least five years, since the models obtained correspond to only one year of evaluation and relatively stable soils.

LISTA DE CUADROS

Cuadro	Titulo:	Página
2.1	Energía cinética de la lluvia y de la escorrentía	8
2.2	Intensidad de las luvias y pérdidas de suelo. Chinchiná, Colombia.	12
2.3	Pérdidas de suelo y agua con distintas frecuencias de aguaceros.	13
2.4	Erosión hídrica y escorrentía para lluvias, con diferentes frecuencias e intensidades.	14
3.2	Modelo de ANDEVA para diseño completamente al azar con arreglo de parcelas divididas en el tiempo.	58
4.1	Distribución mensual de la evapotranspiración potencial (Penman) y precipitación en San Juan Sur, Turrialba (setiembre 1992 - agosto 1993).	62
4.2	Lámina de agua escurrida (mm) y coeficientes de escorrentía por tratamientos. San Juan Sur, Turrialba (setiembre 1992 - agosto 1993).	63
4.3	Pérdida de nutrimentos del suelo (kg/ha) por escorrentía y lixiviación. San Juan Sur, Turrialba (octubre 1992 - setiembre 1993).	64
4.4	Análisis de varianza de los rendimientos de frijol en una rotación frijol - maíz. San Juan Sur (1991 - 1993).	69
4.5	Análisis de varianza de los rendimientos de frijol en una rotación frijol - maíz. San Juan Sur (1991 - 1993).	72
4.6	Análisis de varianza de la extracción de nitrógeno por el frijol en una rotación frijol - maíz. San Juan Sur (1991 - 1993)	75
4.7	Análisis de varianza de la pérdida de suelos por erosión hídrica en una rotación frijol - maíz. San Juan Sur, Turrialba (1993).	98
4.8	Modelos de regresión y coeficientes de correlación simple, para la masa de suelo erosionado (S) y su logaritmo (LS) con diferentes índices de erosividad. San Juan Sur (1993).	99

- 4.9 Intensidad máxima, duración de lluvia, y pérdidas de suelo por erosión hídrica en parcelas desnudas. San Juan Sur (octubre 1992 - setiembre 1993).

En el Anexo

1a	Análisis de varianza de la extracción de Nitrógeno por los cultivos de frijol y maíz. San Juan Sur, Turrialba (1991 - 1993).	113
2a	Análisis de varianza de la extracción de Fósforo por los cultivos de frijol y maíz. San Juan Sur, Turrialba (1991 - 1993).	114
3a	Análisis de varianza de la extracción de Potasio por los cultivos de frijol y maíz. San Juan Sur, Turrialba (1991 - 1993).	115
4a	Análisis de varianza de la extracción de Calcio por los cultivos de frijol y maíz. San Juan Sur, Turrialba (1991 - 1993).	116
5a	Análisis de varianza de la extracción de Magnesio por los cultivos de frijol y maíz. San Juan Sur, Turrialba (1991 - 1993).	117
6a	Análisis de varianza para el balance de Nitrógeno. San Juan Sur (1991 - 1993).	118
7a	Análisis de varianza para el balance de Fósforo. San Juan Sur (1991 - 1993).	120
8a	Análisis de varianza para el balance de Potasio. San Juan Sur (1991 - 1993).	122
9a	Análisis de varianza para el balance de Calcio. San Juan Sur (1991 - 1993).	124
10a	Análisis de varianza para el balance de Magnesio. San Juan Sur (1991 - 1993).	126
11a	Balance anual de nitrógeno en una rotación frijol-maíz. San Juan Sur, Turrialba (1990 - 1993).	128
12a	Balance anual de fósforo en una rotación frijol-maíz. San Juan Sur, Turrialba (1990 - 1993).	129
13a	Balance anual de potasio en una rotación frijol-maíz. San Juan Sur, Turrialba (1990 - 1993).	130

14a	Balance anual de calcio en una rotación frijol- maíz. San Juan Sur, Turrialba (1990 - 1993). . .	131
15a	Balance anual de magnesio en una rotación frijol- maíz. San Juan Sur, Turrialba (1990 - 1993). . .	132
16a	Pérdida de suelos (t/ha) por año y por ciclo de cultivo (frijol, maíz). San Juan Sur (1993). . .	133

LISTA DE FIGURAS

Figura	Título:	Página
3.1	Plano de localización del CATIE y ubicación de las parcelas de escorrentía.	33
3.2	Detalle del sistema colector de una parcela de escorrentía.	37
3.3	Plano del lote experimental y disposición de tratamientos.. . . .	39
3.4	Aspecto general del lote experimental.	40
3.5	Disposición de tratamientos en el bloque C.	40
3.6	Instalación de lisímetros: Preparación del hoyo con un barreno tomamuestras.	46
3.7	Instalación de lisímetros: Colocación del lisímetro a 70 cm de profundidad.	47
3.8	Lisímetro en una parcela con cobertura de <i>I. edulis</i>	47
3.9	Esquema del lisímetro y accesorios para la toma de muestras de la solución del suelo.	53
4.1	Diagrama climático de San Juan Sur, Turrialba (set 92 - ago 93).	61
4.2	Rendimiento de frijol (kg/ha), San Juan Sur, Turrialba (1991 - 1993).	68
4.3	Rendimiento de maíz (kg/ha), San Juan Sur, Turrialba (1991 - 1993).	71
4.4	Extracción de N (kg/ha) por el frijol, San Juan Sur, Turrialba (1991 - 1993).	74
4.5	Extracción de N (kg/ha) por el frijol, San Juan Sur, Turrialba (1991 - 1993).	77
4.6	Extracción de P (kg/ha) por el frijol, San Juan Sur, Turrialba (1991 - 1993).	79
4.7	Extracción de K (kg/ha) por el frijol, San Juan Sur, Turrialba (1991 - 1993).	81
4.8	Extracción de Ca (kg/ha) por el frijol, San Juan Sur, Turrialba (1991 - 1993).	83

4.9	Extracción de Mg (kg/ha) por el frijol, San Juan Sur, Turrialba (1991 - 1993).	85
4.10	Extracción de N (kg/ha) por el maíz, San Juan Sur, Turrialba (1991 - 1993).	87
4.11	Extracción de P (kg/ha) por el maíz, San Juan Sur, Turrialba (1991 - 1993).	89
4.12	Extracción de K (kg/ha) por el maíz, San Juan Sur, Turrialba (1991 - 1993).	90
4.13	Extracción de Ca (kg/ha) por el maíz, San Juan Sur, Turrialba (1991 - 1993).	92
4.14	Extracción de Mg (kg/ha) por el maíz, San Juan Sur, Turrialba (1991 - 1993).	94

En el Anexo

1a	Balance de N en una rotación frijol - maíz, San Juan Sur (1991 - 1993).	119
2a	Balance de P en una rotación frijol - maíz, San Juan Sur (1991 - 1993).	121
3a	Balance de K en una rotación frijol - maíz, San Juan Sur (1991 - 1993).	123
4a	Balance de Ca en una rotación frijol - maíz, San Juan Sur (1991 - 1993).	125
5a	Balance de Mg en una rotación frijol - maíz, San Juan Sur (1991 - 1993).	127
6a	Masa de suelo erosionado (kg/ha). San Juan Sur, Turrialba (1993).	134

I - INTRODUCCION

Los daños causados por la erosión debida al agua no se limitan a la pérdida de productividad agrícola *in situ* y posterior degradación del suelo. La masa de suelo erosionada de una ladera se deposita en las partes bajas y crea problemas como inundaciones, reducción de la navegabilidad de rios, y colmatación progresiva de embalses, entre otros. Este problema está directamente ligado a la agricultura de subsistencia practicada por la mayoría de los pequeños productores de las cuencas del trópico americano. Se considera por tanto de suma importancia la necesidad de recurrir a técnicas orientadas a disminuir las pérdidas de suelo por erosión y a mantener o mejorar la capacidad productiva de estas tierras.

A lo largo de decenios, se han desarrollado y ampliado un conjunto de técnicas para combatir la erosión y mantener la productividad de los suelos. Entre éstas, las técnicas biológicas, por sencillo y económicas, son siempre las primeras que se toman en cuenta (FAO, 1984). En estos últimos años, muchos investigadores han reconocido la capacidad potencial de los sistemas agroforestales para la conservación del suelo, incluyendo aspectos físicos -control de la erosión- y aspectos químico-biológicos -mantenimiento de la fertilidad.

Se han realizado investigaciones para medir las pérdidas de suelo, y de los nutrimentos contenidos en éste, provocadas por erosión hídrica. Sin embargo, aún no existen estudios sobre la cuantificación de pérdidas de nutrimentos del suelo que incluyan otros procesos hídricos, como la escorrentía y percolación del agua. El conocimiento del balance hídrico es de especial importancia para determinar la magnitud del agua percolada, con la que es posible estimar las pérdidas de nutrimentos del suelo por lixiviación.

La presente investigación contempla dos técnicas biológicas y el efecto de éstas en el control de la erosión, y el mantenimiento de la capacidad productiva del suelo. Una, se refiere al cultivo en callejones y la otra, al cultivo con cobertura de residuos vegetales, más conocido como mulch o mulching. Así mismo, utilizando parcelas de escorrentía y lisímetros instalados dentro de estas parcelas, se realizó este estudio para cuantificar las pérdidas de nutrimentos del suelo por erosión hídrica, escorrentía y lixiviación.

A partir de estas consideraciones, para el estudio se establecieron los siguientes objetivos:

Objetivo General.

Cuantificar la pérdida de nutrimentos del suelo por acción del agua de lluvia, en una rotación frijol-maíz bajo coberturas de residuos vegetales asociadas a cultivos en callejones, y realizar un análisis de la dinámica de dichos nutrimentos para un período de tres años.

Objetivos específicos.

1. Cuantificar las pérdidas de N, P, K, Ca y Mg del suelo por erosión hídrica, escorrentía y lixiviación, en tierras de ladera bajo un sistema de rotación frijol-maíz con diferentes prácticas agronómicas, que incluye dos arreglos de cultivos en callejones y dos fuentes de cobertura vegetal muerta.

2. Realizar el balance de N, P, K, Ca y Mg del suelo, para un período de tres años, manejada bajo un sistema de rotación frijol-maíz con diferentes prácticas agronómicas, que incluye dos arreglos de cultivos en callejones y dos fuentes de cobertura muerta.

3. Estudiar la relación entre el suelo erosionado y algunos índices de erosividad de la lluvia, en tierras de ladera de San Juan Sur, Turrialba, en condiciones de barbecho continuo.

El planteamiento de estos objetivos resultó de la formulación de las hipótesis siguientes:

a. Las pérdidas de nutrimentos del suelo por erosión hídrica, escorrentía y lixiviación son diferentes entre ellas, y entre las prácticas agronómicas (cultivo en callejones y cobertura vegetal muerta) comparadas con el sistema tradicional.

b. El sistema de cultivo en callejones y/o la utilización de cobertura vegetal muerta, mantienen el nivel de fertilidad del suelo a través del tiempo, debido a la disminución de pérdidas de nutrimentos del suelo por erosión hídrica y escorrentía, y al aporte de nutrimentos por el tejido vegetal incorporado al suelo.

c. La pérdida de suelo por erosión hídrica, en tierras agrícolas de ladera, está directamente relacionada con las características de la lluvia (intensidad, duración y frecuencia).

II. REVISION DE LITERATURA

2.1 La erosión hídrica.

2.1.1 Definición de Erosión.

La palabra erosión proviene del verbo latino "erodere" que significa roer (Faustino 1986), y se define como el desprendimiento y arrastre acelerado de las partículas del suelo causada por los agentes del intemperismo, agua y aire (Colegio de Posgraduados 1977; Suárez 1980).

Con la finalidad de diferenciar algunos conceptos, se puede definir a la erosión de acuerdo a diferentes acepciones, entendiendo a éste fenómeno como cualquier degradación del suelo que reduce su capacidad para producir cosechas (Hudson 1982). De esta forma es posible hablar de erosión de la fertilidad, erosión biológica, erosión vertical, etc.

Según Ayres (1960) la erosión produce pérdidas de tres categorías distintas: 1) por disolución de valiosos elementos nutritivos para las plantas, 2) la desaparición de finas partículas de limo y humus en suspensión, y 3) arrastre del propio suelo.

La erosión de la fertilidad es la pérdida de nutrientes del suelo por erosión. El proceso de pérdida varía según los diferentes elementos, el fósforo se pierde principalmente con las partículas coloidales, en cuya superficie está absorbido, mientras el nitrógeno en forma de nitrito o nitrato es soluble por lo que se elimina en disolución a través de la escorrentía sin que exista ningún desplazamiento del suelo (Hudson 1982).

Un deterioro físico comparable sin pérdida neta recibe el nombre de erosión en cavidades, porque puede ocurrir en charcos. Se trata de una ruptura física de la estructura por

la lluvia dando como resultado un suelo sin estructura y apelmazado cuya capacidad productiva es mucho más baja. Otra alteración física es el lavado vertical de las partículas finas de arcilla a través de los poros, para acumularse en algún nivel inferior menos permeable del perfil. En suelos arenosos una reducción apreciable de coloides y arcillas tiene su origen en la erosión vertical con la consiguiente disminución de su fertilidad (Hudson 1982).

2.1.2 Clases de erosión y su importancia.

En la naturaleza nada hay absolutamente estático. La eterna transformación es una ley fundamental. Los procesos naturales entre ellos la erosión, han determinado la formación del suelo a partir de rocas originarias (Ayres 1960).

La erosión siempre ha existido y seguirá existiendo; sin embargo se debe diferenciar dos tipos de erosión de acuerdo a la participación del hombre en el proceso: la "erosión geológica", "erosión normal", o "erosión natural" que resulta sólo de las fuerzas de la naturaleza, y la "erosión acelerada" cuando el proceso está influenciado por el hombre (Hudson 1982). Las fuerzas de formación del suelo con las de destrucción del mismo están esencialmente en equilibrio. Lo que la naturaleza tarda cientos o miles de años de años en hacer, el hombre lo destruye a menudo de la noche a la mañana (Ayres 1960).

Erosión geológica o natural.

La erosión geológica o natural se inició en el instante en que sopló la primera brisa y cayeron las primeras gotas de agua; El agua y el viento transportan partículas de material meteorizado y las depositan en sitios más o menos distantes (Suárez 1980).

El suelo no es ninguna masa inerte, sino un conjunto delicadamente equilibrado de partículas minerales, materia orgánica y organismos vivos en equilibrio dinámico (PNUMA 1987).

Los procesos físicos, químicos y biológicos que intervienen en la formación de los suelos están a su vez gobernados por factores del medio ambiente tales como el clima y la vegetación. Ellos actúan en forma combinada y variable, de manera que los suelos resultantes de su acción son complejos organismos sujetos a mudanzas continuas y que nunca alcanzan una condición estática (Suárez 1980). La naturaleza misma trata de establecer el equilibrio generando nuevo suelo a medida que el anterior se pierde (Montenegro y Malagón 1990).

Erosión acelerada o antrópica.

La actividad del hombre rara vez retrasa o detiene el proceso de la erosión; lo más normal es que lo acelere. La explotación de la tierra contempla el cambio de la vegetación natural y la preparación del terreno para la implantación de cultivos, ciudades o vías de comunicación, desencadenando un proceso dinámico, inercial, que incrementa la tasa de erosión (Montenegro y Malagón 1990).

El suelo es un recurso no renovable: una vez destruido, desaparece para siempre. Si bien la erosión del suelo es un fenómeno natural, se trata de un proceso lento. El hombre ha acelerado el ritmo de la erosión natural. Existen claras pruebas de que la destrucción de civilizaciones pasadas - en el mediterráneo y América Central - se debió a la erosión del suelo causada por la tala de bosques en zonas escarpadas y otras prácticas destructivas (FAO 1984).

2.1.3 El proceso de la erosión hídrica.

La erosión hídrica se define como el proceso de desprendimiento y arrastre acelerado de las partículas del suelo causado por el agua (Suárez 1980). La erosión del suelo es un trabajo mecánico en el sentido físico del término, según el cual, trabajo equivale a un gasto de energía en todas las fases de la erosión: para desprender y transportar partículas de suelo (Hudson 1982).

En general, el desprendimiento se incrementa con el tamaño de las partículas del suelo, mientras que la transportación se incrementa con una disminución en el tamaño de las partículas. Esto es, partículas de arcilla son más difíciles de desprender que las arenas pero son más fáciles de transportar (FAO 1963).

La erosión puede descomponerse en separación de las partículas sueltas del suelo, en transporte y, en sedimentación de dichas partículas. El principal efecto de las gotas de lluvia es el desprendimiento de las partículas, mientras que el efecto principal de la escorrentía es el transporte de estas partículas desprendidas (Hudson 1982).

Se distinguen, por tanto, dos tipos de erosión hídrica: la erosión por salpicadura, como resultado del impacto directo de las gotas de lluvia, y la erosión por escurrimiento, referida al arrastre del suelo por el flujo de aguas en la superficie (Faustino 1986).

Aunque Bennett (1965) y Ayres (1960) consideraban al escurrimiento rápido del agua sobre las superficies expuestas del suelo como el causante de la erosión hídrica, actualmente se considera al impacto de las gotas de lluvia como la responsable de la erosión. Desde luego, como manifiesta Hudson (1982), existe una interacción entre erosión de impacto y

escorrentía, ya que el impacto tiende a sellar la superficie del suelo y aumenta la escorrentía pero, de todos modos la erosión en condiciones naturales depende principalmente del impacto de la lluvia.

La importancia de la erosión por impacto en el conjunto del proceso erosivo se muestra en el cuadro 2.1.

cuadro 2.1 Energía cinética de la lluvia y de la escorrentía
Energía cinética = $1/2 * masa * (velocidad)^2$

	Lluvia	Escorrentía
Masa	supongamos que la masa de la lluvia que cae es R	si se supone un 25% de escorrentía, la masa circulante es R/4
Velocidad	supongamos una velocidad límite de 8m/seg	supongamos una velocidad de flujo superficial de 1 m/seg

En. cinét $1/2 * R * (8)^2 = 32R$ $1/2 * R/4 * (1)^2 = R/8$
Así pues la lluvia tiene 256 veces más Ec que la escorrentía
Fuente: Hudson (1982).

Según Thornes (1980) la dispersión por efecto de la lluvia ocurre básicamente como resultado de las fuerzas de impacto de las gotas de agua. Una gota de lluvia que cae sobre un suelo húmedo produce una corona de dispersión, cada una de cuyas gotas consta de una o dos partículas de suelo encerradas en una película de agua. La gota describe una curva parabólica, que se mueve lateralmente cuatro veces su altura. La masa total que se transporta en una superficie plana, decae exponencialmente con la distancia desde el punto del impacto. La dispersión cuesta abajo viaja más lejos que cuesta arriba, aproximadamente tres veces mas lejos en una pendiente de 10%. además las partículas son lanzadas por el impacto de otras partículas que vienen de cuesta arriba. Las principales

fuentes de energía para este proceso son la energía cinética de la precipitación pluvial y la energía gravitacional (potencial).

Las gotas de lluvia golpean los agregados del suelo disgregándolas en partículas más pequeñas. Con el transporte dentro del perfil del suelo por el agua de infiltración, los poros se cierran progresivamente reduciendo así la tasa de infiltración (Hallsworth 1987). Cuando la intensidad del aguacero sobrepasa la velocidad de infiltración del agua en el suelo, se presenta la escorrentía (Federación Nacional de Cafeteros de Colombia 1975), que comienza en forma laminar (Montenegro y Malagón 1990), luego por arroyamiento en rigolas, cárcavas y erosión fluvial (Hudson 1982).

Las rigolas son pequeños arrastres en canales suficientemente pequeños como para poder eliminarlas con los métodos normales de labranza, dichos canales se consideran cárcavas cuando son tan amplios y encajados que no pueden ser atravesados con los aperos agrícolas.

Otras formas de erosión provocadas por el agua son: la remoción en masa, los derrumbes y los deslizamientos (Montenegro y Malagón 1990).

2.2 Factores de la erosión hídrica.

Los principales factores que intervienen en la erosión hídrica de los suelos son: la lluvia, el suelo, la cobertura vegetal y la topografía. Para que la erosión se produzca es necesario que exista una fuente de energía, esta fuente de energía es la lluvia y por eso se le llama factor activo (Dourojeanni y Paulet 1967). La resistencia que ejerce el suelo (factor pasivo) a la acción erosiva del agua, está

determinada por diversas características o propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo, y por la naturaleza y cantidad de vegetación que en él crecen (Suárez 1980).

La erosión pluvial resulta entonces de la interacción de dos elementos, el suelo y la lluvia. La magnitud de la erosión que se da en unas circunstancias determinadas depende de ambos factores. El efecto de la lluvia se denomina erosividad y, del suelo, erodibilidad. La erosividad es la capacidad potencial de la lluvia para provocar la erosión, y es función de las características físicas de la lluvia. La erodibilidad es la susceptibilidad del suelo a la erosión; es función tanto de las características físicas del suelo como del tratamiento que se le da a éste (Hudson 1982).

Según el mismo autor, un valor en la escala de erosividad depende exclusivamente de las propiedades de la lluvia, y en este aspecto es independiente del suelo. Pero una medida cuantitativa de la erosividad sólo puede efectuarse cuando la erosión tiene lugar, lo que involucra a la erodibilidad del material erosionado. Del mismo modo, los valores relativos de erodibilidad no son influenciados por la lluvia, pero sólo puede medirse cuando la lluvia, con una determinada erosividad, los pone de manifiesto.

Para O'Loughlin (1985), muchos factores físicos y biológicos influyen en la erosión y estabilidad de laderas en tierras de bosque. Estas pueden agruparse en :

- factores climáticos tales como la intensidad y duración de lluvia y los cambios de temperatura;
- factores del suelo tales como parámetros de consistencia, distribución de partículas, contenido y tipo de arcilla, capacidad de infiltración, condición de drenaje del suelo, porosidad, contenido de materia orgánica, estratificación y contactos líticos;

- factores fisiográficos tales como el grado, longitud y uniformidad de la pendiente;

- factores de la vegetación tales como la densidad y tipo de cobertura, grosor de los residuos forestales, distribución y fortaleza de las raíces de los árboles;

- factores relacionados al hombre, como construcciones de caminos y carreteras, tumba de árboles, aclareo para conversión a otros usos; y

- factores relacionados con los animales, tales como el sobrepastoreo o sobrecarga de ganados domésticos o poblaciones de animales salvajes.

2.2.1 Lluvia.

Según Sánchez (1981), la precipitación pluvial es el parámetro climático más importante para la agricultura tropical, en términos tanto de exceso como de déficit.

La lluvia es usualmente la mayor fuente de la energía necesaria para el movimiento de las partículas del suelo (Hallsworth 1987). Ejercen un efecto mecánico sobre los agregados del suelo debido al impacto de las gotas que desprenden las partículas y así son arrastrados fácilmente por el agua de escorrentía. La velocidad y el volumen de escorrentía, están directamente relacionados con la intensidad y frecuencia de los aguaceros (Federación Nacional de Cafeteros de Colombia 1978).

La intensidad es la cantidad de lluvia caída en un determinado tiempo. Cuando la intensidad de un aguacero sobrepasa la velocidad de infiltración del agua en el suelo, se presenta la escorrentía; esta aumenta con el grado de humedad del suelo, el cual está determinado por la frecuencia y cantidad de lluvias anteriores.

La frecuencia es el tiempo transcurrido entre los aguaceros. Si los intervalos entre las lluvias son cortos es alto el contenido de humedad del suelo al comenzar aquellas y se aumenta la posibilidad de que se origine escorrentía, aun con lluvias de baja intensidad. Si por el contrario son largos los períodos entre lluvia, el suelo estará seco y no habrá escorrentía con aguaceros de baja intensidad (Federación Nacional de Cafeteros de Colombia 1978).

La intensidad con que la lluvia cae afecta la cantidad total de agua disponible para escorrentía, y por ende el potencial de la capacidad de transporte de la escorrentía. Si la intensidad no excede la capacidad de infiltración del suelo, la lluvia será absorbida tan fácil como llega a la superficie. Tan pronto como la tasa de llegada excede la capacidad de infiltración, ocurrirá escorrentía, que aumenta con el incremento de la intensidad (Hallsworth 1987).

Según Suárez (1980), la intensidad del aguacero es el factor pluviométrico más importante que afecta la escorrentía y la erosión, aunque ejerce mayor influencia sobre el segundo fenómeno (cuadro 2.2).

Cuadro 2.2 Intensidad de las lluvias y pérdidas de suelo. Chinchiná, Colombia.

Cantidad de lluvia (mm)	Imáx en 5´ (mm)	Escorrentía (mm)	Erosión (t/ha)
20,6	7,9	6,8	7,35
21,4	5,0	11,1	1,74
18,0	4,5	7,8	1,06
21,8	2,2	4,5	0,47
20,0	1,9	0,8	0,12
22,0	1,0	¿ ?	0,06

Fuente: Suárez (1980).

La duración del aguacero es el complemento de la intensidad; la asociación de las dos determina la precipitación total. Al caer una lluvia de intensidad uniforme sobre un suelo, el agua se infiltra durante un lapso más o menos largo según sean las condiciones de humedad y la intensidad de la precipitación; después comienza la escorrentía, la cual va aumentando su volumen en proporciones cada vez más pequeñas hasta alcanzar un volumen estable.

La frecuencia de las lluvias es crítica con respecto a las condiciones de los terrenos. Si los intervalos entre lluvia son cortos, es alto el contenido de humedad del suelo al comenzar aquéllas y aumentan los riesgos de que se originen escorrentías, aun con lluvias de baja intensidad. Si por el contrario, son largos los periodos entre lluvias, el suelo estará seco y no habrá escorrentías con aguaceros de baja intensidad (cuadro 2.3). En el caso extremo la vegetación puede sufrir por falta de humedad y reducirse así la protección del terreno (Alonso et al 1979).

cuadro 2.3 Pérdidas de suelo y agua con distintas frecuencias de aguaceros*.

lluvia anterior	lluvia que causó erosión	cantidad (mm)	Int.5! (mm)	Esc. (mm)	Eros. t/ha
agosto 3	agosto 20	17,8	3,0	0,09	0,002
octubre 20	octubre 22	12,6	2,2	2,36	0,395

* Estos datos se obtuvieron de parcelas desnudas.
Fuente: Alonso et al (1979).

En el cuadro 2.3 se observa que el aguacero ocurrido después de 17 días de no llover, no ocasionó sino 0,09 mm de escorrentía y una erosión de 0,002 t/ha, en tanto que el aguacero del 22 de octubre, el cual cayó sólo dos días después

de carencia de lluvia, produjo 2,36 mm de escorrentía y 0.395 t/ha de erosión, a pesar de que la cantidad e intensidad de este aguacero son menores que las del examinado en primer término.

Otro caso similar se muestra en el cuadro 2.4 (Centre Technique Forestier tropical 1979). En éste la lluvia del 24 de diciembre, a pesar de tener una intensidad tres veces menor a la lluvia del día anterior, provocó una erosión tres veces mayor y una escorrentía siete veces mayor.

Cuadro 2.4 Erosión hidrica y escorrentía para lluvias, con diferentes frecuencias e intensidades.

Fecha de lluvia	Cantidad de lluvia (mm)	Duración de lluvia (min)	Erosión (t/ha)	Escorrentía (%)
23/12/59	26	30	1,0	5,4
24/12/59	24	90	3,3	39,0

Según Hudson (1982) las lluvias en condiciones del trópico son mucho más intensas que en condiciones templadas. Así mismo, pocos aguaceros durante el año generan grandes pérdidas de suelo sobre todo en áreas sin protección. El mismo autor afirma para condiciones tropicales que las lluvias son en un 40% de intensidades mayores a $25 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$, a partir del cual son erosivas; en condiciones templadas solamente un 5% de las lluvias tienen alta intensidad y poder erosivo. Unos pocos aguaceros son, por lo tanto, los causantes de casi la totalidad de las pérdidas de suelo por erosión que ocurren en una región.

En Chinchiná, Colombia (Suárez 1980) determinó que en un lapso de 8 años, el 9,9% de aguaceros fueron los responsables del 88,7% de las pérdidas de suelo. Esos pocos aguaceros

aportaron el 35% del agua caída durante el periodo. Roose y Lelong (1976), por su parte observaron que sólo 10 a 20 lluvias al año son responsables del mayor porcentaje de erosión en condiciones tropicales húmedas.

Es necesario tener en cuenta las frecuencias de ocurrencia de las lluvias y las variaciones periódicas de intensidad para ajustar a ellas la aplicación de prácticas culturales y de conservación.

2.2.2 Suelo.

Al considerar un suelo, la cualidad más significativa inherente al mismo es probablemente lo que se podría denominar coeficiente de dispersión, o sea la facilidad con que las partículas individuales pasan a estar en suspensión en el agua. Los suelos con déficit de arcilla presentan esta propiedad en notable grado, debido a la insuficiencia de arcilla para servir de aglomerante (Ayres 1960).

La experiencia ha mostrado que todos los suelos no presentan las mismas resistencia a la erosión y que esta resistencia varía de acuerdo a las propiedades químicas y físicas de los diferentes tipos de suelos. Henin a puesto en evidencia que la resistencia de un suelo a la erosión depende esencialmente de la estabilidad estructural y de la permeabilidad (Centre Technique Forestier Tropical 1979).

La erodibilidad del suelo es su vulnerabilidad frente a la erosión; La evaluación depende de numerosas variables que podrían agruparse en dos (Hudson 1982): edáficas (relacionadas con su composición mecánica, química y física), y de tratamiento (prácticas a los que está sometida el suelo). En la ecuación Universal de Pérdida de Suelos el primer grupo (edáfico) permite conocer el factor K, mientras que el segundo grupo se subdivide en los factores LS, C y P.

En cuanto a las características edáficas se han desarrollado muchos métodos para relacionar la erodabilidad del suelo con sus características físicas. Fue Wischmeier en 1971 quien lo simplificó y perfeccionó hasta hacerlo práctico utilizando sólo cinco variables: % de limo, % de arcilla, % de arena con partículas mayores que 0.1 mm, contenido de materia orgánica y permeabilidad del suelo (Hudson 1982).

Otros factor relacionado al suelo es la fisiografía del terreno que comprende la forma, grado y longitud de la pendiente. En terrenos poco inclinados, la ausencia o presencia de canales afecta el poder erosivo de la escorrentía. Esta influencia de la condición superficial del terreno, no afecta a la escorrentia en terrenos muy inclinados (Hudson 1977).

También existe un limite de pendiente a partir del cual se percibe la influencia de la inclinación del terreno sobre la escorrentía. Lal (1976), trabajando en un alfisol de Nigeria encontró que la escorrentia no es problema en terrenos con pendientes entre 1 y 15%.

La erosión por escorrentía parece estar intimamente ligada a la longitud de la pendiente, lo que se explica porque al incrementarse la velocidad de la escorrentia superficial aumenta su poder erosivo. Otro aspecto que se debe considerar al trabajar con pendientes promedio es que se subestima la pérdida de suelos en pendientes convexas, y se sobreestima en las cóncavas (Hudson 1977).

Un proceso que está estrechamente relacionado con la erosión de los suelos es el agotamiento físico de la materia orgánica y de las sustancias nutritivas del suelo que consumen las plantas (Kirby 1984).

2.3 Cobertura vegetal e importancia.

El concepto de cobertura es bastante amplio y se refiere a la capa de material vegetal existente de manera natural o artificial sobre la superficie del suelo. También se incluyen plásticos oscuros o transparentes, papel, cartón, residuos vegetales (mulch) o cobertura muerta de malezas que crecen *in situ* (Dominguez 1990, citado por Sánchez 1993).

La interacción entre la lluvia y el suelo como forma de explicar la erosión es significativamente modificada por la presencia de una cobertura vegetal.

Según Morgan (1984), las propiedades de la cobertura vegetal que determinan la efectividad en la protección del suelo son: la altura, cobertura del terreno, y densidad.

La importancia de la cobertura quedó demostrada en los experimentos de tela de mosquitero por obra de Hudson y Jackson en 1959. A dos parcelas idénticas se les mantuvo libres de hierbas y sobre una de ellas se suspendió una fina tela de alambre para romper la fuerza de la gotas de lluvia, absorber su impacto y permitir que el agua cayera a la superficie del terreno desde una baja altura como un fino rocío. La pérdida anual promedio de suelo a lo largo de seis años fue de $141,3 \text{ m}^3\text{ha}^{-1}$ para la parcela desnuda y $1,2 \text{ m}^3\text{ha}^{-1}$ para la parcela protegida por la tela (Morgan 1984).

Con una vegetación más alta, el efecto de absorción de las gotas de lluvia se reduce en gran medida. Un dosel de árboles a considerable altura podría aumentar la energía de las gotas de lluvia mediante el fenómeno de coalescencia (Nair 1989). En los bosques y en los cultivos de árboles las gotas de lluvia se juntan sobre las hojas del follaje y se unen en gotas de diámetro más grande que al caer alcanzan el 80 a 90% de su velocidad terminal antes de golpear el suelo (Morgan 1984).

En relación con los efectos de las coberturas vegetales sobre la erosión se consideran los siguientes (Morgan 1984):

a) reducción del impacto de las gotas de lluvia que caen como resultado de la intercepción de la precipitación pluvial.

b) mayor resistencia al aire y al flujo del agua mediante una mayor aspereza.

c) deposición de sedimentos producida por una reducción en la velocidad del flujo.

d) mayor capacidad de infiltración como resultado de la abertura del suelo debido al crecimiento de las raíces.

e) mayor estabilidad estructural como consecuencia del aumento en el contenido de materia orgánica del suelo; y

f) menor escorrentía sobre el suelo cubierto de vegetación comparado con lo que ocurre en el suelo desnudo, como resultado de una mayor intercepción, infiltración y evapotranspiración.

Ayres (1960), refiriéndose a lo mismo, menciona otro efecto:

g) añadidura de humus al suelo, con lo que facilita la introducción del aire en el mismo, creando así un ambiente más favorable para la actividad microbiana.

Una buena cobertura vegetal agrega, a través de sus hojas, materia orgánica al suelo protegiéndolo de la escorrentía y la erosión. Según Berrios (1965), los efectos de la capa de materia orgánica sobre la superficie del suelo, con relación a la escorrentía y la erosión pueden resumirse en los siguientes:

1. protege al suelo mineral del impacto directo de las gotas de lluvia.

2. en caso de ocurrir salpicaduras de partículas minerales, esta capa de materia orgánica sirve de filtro evitando una obturación de los poros superficiales del suelo.

3. si se presenta escorrentía superficial, la capa de materia orgánica sirve de obstáculo y disminuye la velocidad del agua, mitigando así su capacidad de disgregar y transportar partículas de suelo.

Los residuos de cosecha como cobertura, también actúan aislando la superficie del suelo contra los cambios bruscos de temperatura. Los suelos parcialmente cubiertos con una capa de residuos tienden a aumentar menos rápidamente su temperatura que el suelo desnudo. La cobertura de residuos también reduce la pérdida de calor del suelo (Bartholomew 1975). Este aspecto es muy importante en regiones tropicales donde se ha probado que el suelo desnudo, sometido a la acción directa del sol y del agua de lluvia, sufre graves y rápidos daños en su productividad (Alonso et al 1979).

Una fuente barata de suministro constante de mulch son los restos del cultivo en callejones, el cual es en realidad un eficiente proveedor de nutrientes. La necesidad de identificar más plantas leguminosas y/o micorríticas para la producción de mulch es de importancia en el trópico húmedo (Lawrence 1992).

Las tres vías para producir residuos orgánicos para cobertura son los siguientes:

a) producción simultánea *in situ*: es un método donde los materiales orgánicos para mulch son generados junto con el crecimiento de cultivos al mismo tiempo. Un ejemplo de éste son los cultivos en callejones.

b) el barbecho rotacional: en este caso la regeneración natural de la vegetación barbechada o el crecimiento del cultivo de barbecho preferido. estas pueden ser cultivos que inducen asociación micorrítica, fijación de nitrógeno.

c) el otro método es producir mulch sobre terrenos separados y transportarlo a la parcela deseada.

Wiersum et al (1979), observaron que una buena capa de materia orgánica sobre el suelo es la mejor forma de protegerlo de la escorrentia y la erosión, asimismo diferentes tipos de vegetación modifican la escorrentia y la erosión de acuerdo a su capacidad para acumular materia orgánica sobre el suelo.

Eke et al (1990), utilizando parcelas de escorrentia colocadas sobre pendientes de 4 a 6%, en terrenos con textura superficial franco limosa, drenaje interno medio, contenido de materia orgánica relativamente baja, tasa de infiltración lenta y baja capacidad de almacenamiento de humedad reporta pérdidas de suelo de 1679, 704, 338 y 168 kg/ha en cultivos de frambuesa, mora, soya y camote, respectivamente. La lluvia en este período fue 821.8 mm. Las altas pérdidas observadas en las parcelas de frambuesa se atribuyen a su pobre estado de desarrollo.

Otro efecto importante de las coberturas es el control de las malezas. Salazar (1990) citado por Contreras (1991), concluye que que *I. edulis* resulta apta en asociaciones con maíz, caupí o arroz, y controla malezas debido a su lenta descomposición. Por otro lado, Szott et al (1991), citados por la misma autora, menciona que Inga se descompone lentamente, pero una acumulación paulatina puede crear un ambiente propicio para la descomposición más acelerada de los mismos.

2.4 La Ecuación Universal de Pérdida de Suelos (EUPS).

El método de uso más amplio para la predicción de pérdida de suelo por parte de los extensionistas en los Estados Unidos es la Ecuación Universal de la Pérdida de Suelos (Mitchell y Bubenzer 1984). Esta se expresa como:

$$A = RKLSCP$$

donde:

A= pérdida de suelo

R= factor de erosividad por precipitación pluvial.

K= factor de erodibilidad del suelo.

L= factor de longitud de pendiente

S= factor de gradiente de pendiente

C= factor de manejo de cosechas, y

P= factor del método de control de la erosión.

Según Wischmeier (1976), citado por Mitchell y Bubbenzer (1984) la EUPS puede utilizarse adecuadamente para:

1. predecir la pérdida anual de suelo de una pendiente en un campo con condiciones específicas para uso de la tierra;
2. servir como guía en la selección de sistemas de cultivo y manejo, y de prácticas de conservación para suelos y pendientes específicos;
3. predecir el cambio en la pérdida de suelo que resultaría de un cambio en las cosechas de conservación en un campo específico;
4. determinar cómo pueden aplicarse o alterarse las prácticas de conservación para permitir un cultivo más intensivo;
5. Estimar las pérdidas de suelo en áreas con un uso del suelo distinto del agrícola; y,
6. obtener estimaciones de pérdida de suelos para que los conservacionistas determinen las necesidades de conservación.

Los factores de la EUPS se desarrollaron mediante una unidad de evaluación llamada la parcela estándar. Una parcela estándar es de una longitud de 22,13 m, y 1,83 m de ancho (lo que daba un área de 0.01 acres) sobre una pendiente uniforme de 9% en sentido longitudinal. La parcela fue labrada hacia arriba y hacia abajo de la pendiente y estuvo bajo barbecho.

2.5 Índices de erosividad de la lluvia.

El poder erosivo de las lluvias (erosividad) es un factor importante para explicar la pérdida de suelos por erosión. Se han desarrollado muchos índices en condiciones de clima diversos; Sin embargo, los índices de mayor uso parecen ser el de Wischmeier (EI30), y el propuesto por Hudson (KE>1).

El Índice EI30.

La energía cinética de la lluvia está estrechamente relacionada a la intensidad, y es importante en la determinación del grado en que la lluvia causa la disgregación de los agregados del suelo (Hallsworth, 1987).

Wischmeier et al (1958) citados por Hudson (1982) demostraron que el factor más correlacionado con la erosión era el producto de la energía cinética de la tormenta por la intensidad máxima en 30 minutos, al que se denominó índice EI30 (R en la EUPS). Puede calcularse para cada tormenta y los valores resultantes pueden sumarse para dar valores semanales, mensuales o anuales de erosividad

El índice KE>1.

Dado que en Africa el índice EI30 no era tan eficaz como podría esperarse a partir de los estudios de Wischmeier en América, se desarrolló otro método basado en el concepto de que existe un valor umbral de la intensidad, a partir del cual la lluvia comienza a ser erosiva. Esta idea se desprende de la observación de que a intensidades muy bajas se da una escasa o ninguna erosión (Hudson 1982).

Elwell y Stocking (1975) citados por Hallsworth (1987) estudiando índices de erosividad de la lluvia en Zimbabwe encontraron que el EI₁₅ es la que mejor relaciona con el suelo perdido en parcelas con una cobertura vegetal casi total; EI₁₅ para cultivos de cobertura en estado inicial.

La mayoría de los estudios realizados en la cuenca de Turrialba (Rocha 1977, Apolo 1980, Bermúdez 1980, Romero 1991) indican que la característica de la lluvia que mejor se relacionó con la escorrentia fue la precipitación total. Romero (1991) encontró una buena correlación con el factor R cuando se calculó con base a una intensidad máxima en 15 minutos (EI_{15}).

Garzón (1991) menciona que el índice de erosividad (EI_{30}) de Wischmeier, fue el que mejor correlacionó con el logaritmo del material erosionado. Sin embargo, otro denominado IRR que toma como base el umbral de 25 mm de Hudson, se muestra potencialmente como uno de los más indicados.

2.6 Tolerancia de pérdida de suelos.

Según Wischmeier (1978) El término tolerancia de pérdida de suelo denota el máximo nivel de suelo erosionado que permita un alto nivel de productividad de cultivo para sostenerla económica e indefinidamente.

Sin embargo, es muy difícil delimitar las fronteras entre la erosión geológica y la inducida, por lo que se ha pensado en establecer límites de tolerancia en la pérdida de suelo. Se considera como límite máximo, aquel en el cual se mantiene un nivel alto de productividad por un largo tiempo; es decir que no se manifiesta un deterioro progresivo de ésta y el espesor del suelo (FAO 1963). Ello se consigue cuando la tasa de pérdida del suelo no es superior a la tasa de su formación (Hudson 1982).

Es imposible reducir la tasa de pérdida de suelos a cero; existen un conjunto de límites como objetivos para el diseño de sistemas de uso de la tierra (Young 1989).

La tolerancia sobre la pérdida de suelo depende del tipo de éste, de su profundidad, y de sus características físicas. Los límites aceptables de pérdida de suelo raras veces exceden 12.5 t/ha/a, y frecuentemente es menor; la federación Centroafricana no acepta más de 10 t/ha/a para suelos arenosos y 12.5 t/ha/a para suelos arcillosos. Dichas cifras se relacionan con las prácticas agronómicas recomendadas por la EUPS (Hudson 1982).

El valor de 12.5 t/ha/a se toma porque la estimación más acertada de los edafólogos indican que bajo condiciones no alteradas son necesarios unos 300 años para producir 25 mm de suelo, pero si las alteraciones, la aereación y la lixiviación son muy rápidas por efecto del arado, se necesitan aproximadamente 30 años. Una tasa de formación de 25 mm en 30 años significa unas 12.5 t/ha/a (Hudson 1982).

2.7 Balance hídrico y fenómenos asociados al proceso.

2.7.1 Principio general.

El balance hídrico es una expresión detallada de la Ley de la Conservación de la Masa, la cual indica que la masa no se crea ni se destruye, solamente cambia de un estado o lugar a otro (Jiménez 1986).

Según Maraux y Rapidel (1990a), la ecuación fundamental del balance hídrico se deriva del principio de la conservación general del agua: de la totalidad del agua aportada mediante la precipitación (PRE), o por el riego (RIE), el agua puede:

- ser evaporada desde el suelo, o ser transpirada por la planta. En este caso, uniendo las dos se habla de evapotranspiración (ETR) de la cobertura vegetal;

- filtrarse hacia la profundidad del suelo, fuera del alcance de las raíces de las plantas cultivadas; en este caso se habla de drenaje (DRE);

- escurrir sobre la superficie del suelo, y ser recolectada fuera de un área agrícola; en este caso se habla de escurrimiento (ESC);

- ser almacenada por el suelo, y recargar la reserva de agua (RES) del mismo.

Por lo tanto, entre dos fechas (1) y (2), se puede escribir la ecuación del balance hidrico como sigue:

$$PRE + RIE = ETR + DRE + ESC + [RES(2) - RES(1)] \dots (2.1)$$

Si no se aplica riego, la ecuación se simplifica a:

$$PRE = ETR + DRE + ESC + [RES(2) - RES(1)] \dots (2.2)$$

2.7.2 Percolación del agua y lixiviación de nutrimentos.

El agua de lluvia, después de saturar las capas más profundas del perfil del suelo, percola hacia los drenajes internos o la capa freática. Esta agua percolada es llamada gravitacional debido a la importancia de la gravedad en su movimiento hacia abajo (Jiménez 1986).

A alguna profundidad en el suelo siempre existe una capa impermeable; luego de alcanzar ésta el agua gravitacional se acumula y forma un horizonte de profundidad variable llamado capa freática. Todos los poros de este horizonte están totalmente saturados de agua; esta puede tener flujo lateral si existe un gradiente de carga hidráulica (Rode 1970, citado por Jiménez 1986).

Un fenómeno asociado a este proceso es la lixiviación de los elementos nutritivos contenidos en el suelo. De acuerdo a la Soil Science Society of América (1979), lixiviación es la remoción de los materiales del suelo que se encuentran en solución.

La lixiviación de nutrimentos del suelo resulta de la interacción entre dos fenómenos: la presencia de iones minerales disueltos en la solución del suelo, y el desplazamiento de dicha solución fuera del sistema.

Cuando las aguas de lluvia penetran en el suelo, los elementos fácilmente solubles pasan de las capas superficiales del suelo a las más profundas. De esta manera el nitrógeno y el calcio se lavan fácilmente, el potasio y el magnesio moderadamente y el fósforo muy poco (Gavande 1972).

Imbach (1987), menciona que existen cinco metodologías principales para efectuar las determinaciones de lixiviación. Estas pueden agruparse en:

a) métodos en que se determinan simultáneamente la concentración de nutrimentos en la solución de lixiviación y su volumen. Este grupo comprende:

- Método de los lisímetros de campo
- Método de los lisímetros monolíticos
- Método de los lisímetros de tensión cero
- Método de los lisímetros de porcelana

b) Métodos en que se determinan por separado la concentración de nutrimentos en el lixiviado de suelos y el volumen total de agua percolado. Comprende:

- Método de muestreo con cápsulas lisimétricas y estimación de la percolación mediante modelos matemáticos.

En el presente documento, se hace referencia al segundo método, que consiste en utilizar cápsulas de porcelana para obtener muestras de la solución lixiviada. El primer aparato fue descrito por Briggs y Mc Call en 1904 y probadas por Krone en 1951. Posteriormente Wagner (1962) tomando la idea, diseña un aparato para muestrear el agua del suelo a diferentes

profundidades del perfil del suelo; utiliza una cápsula de 1.9 pulgadas de diámetro y propone su uso, en estudios de fertilidad y lixiviación, en reemplazo de los lisímetros cuya instalación es costosa.

En años recientes, versiones mejoradas de cápsulas lisimétricas se están utilizando en estudios de contaminación ambiental, específicamente en polución del agua (Wood 1973; Hansen y Harris 1975). El uso de las cápsulas lisimétricas es considerado una de las más prometedoras vías para recolectar muestras de la solución del suelo (Hansen y Harris 1975).

El agua percolada puede ser medida directamente por medio de lisímetros. Sin embargo, ésta es una labor altamente difícil y costosa, por lo que muchas veces se estima utilizando la ecuación del balance hidrico.

2.7.3 Evapotranspiración.

El concepto de evapotranspiración que involucra los fenómenos de evaporación y transpiración de manera conjunta, ha sido introducida debido a la dificultad que existe para separar con precisión los dos valores y por la conveniencia de usar este concepto que representa el consumo de agua por una plantación dada (Blair 1959).

Se conoce como evapotranspiración potencial a la máxima evapotranspiración posible que se da en condiciones favorables cuando el suelo está bien provisto de agua, prácticamente dentro de su capacidad de campo, y tapizado por una vegetación o cubierta vegetal densa, pareja y de poca altura. En cambio la evapotranspiración real es la que se da en las condiciones reales del medio, considerando fluctuaciones que expresan niveles variables en la humedad del suelo y con una cubierta vegetal incompleta, lo que podría ser, por otra parte, lo habitual en algunos cultivos (Luque 1980).

Se han propuesto numerosas fórmulas climatológicas empíricas para estimar la evapotranspiración potencial; entre estas figuran las que desarrollaron Blaney y Criddle, Thornthwaite, Leichtmann y Turc. Estas fórmulas no son aplicables universalmente a todas las zonas climáticas. Deberían ser empleadas después de haberlas verificado, comparándolas con métodos basados en principios físicos sólidos (como por ejemplo, el método de Penman) o mediante mediciones directas de lisímetros o de campos experimentales (Baldión 1985, citado por Montenegro y Malagón 1990).

La ecuación de Penman basada en una combinación del balance de energía y consideraciones del transporte aerodinámico, es una de las principales contribuciones en el campo de la física ambiental y agrícola. La dificultad de la fórmula de Penman es la necesidad de contar con datos meteorológicos de varios elementos climáticos: energía radiativa, temperatura, humedad atmosférica y velocidad del viento (Jiménez y Hernández 1990).

2.8 Suelos volcánicos, características y manejo.

Bajo el nombre "Ando" se agrupan suelos minerales, en donde la fracción activa está representada por el material amorfo. Estos suelos provienen de cenizas volcánicas en los que la fracción fina separada presenta una relación $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ cercano a 10 la cual se considera muy alta.

Los andosoles se caracterizan por poseer un alto contenido de arcillas amorfas (alófanos principalmente), y por tener un horizonte húmico muy diferenciado. De manera general tiene contenidos muy altos de materia orgánica. Sin embargo no se sabe mucho acerca del comportamiento de los diferentes tipos de sustancias orgánico-minerales presentes en ella (Fassbender y Bornemisza 1987).

Una de las propiedades químicas más importantes del alófono es la marcada tendencia de su aluminio por activarse a valores bajos de pH; otra propiedad, es la relativa fácil pérdida de bases intercambiables y la tendencia a desarrollar grados muy bajos de saturación de bases, incluso para el calcio (Okajima 1980). El pH del suelo depende grandemente de la precipitación pluvial, de allí que a medida que esta aumenta, el pH tiende a disminuir. La abundancia de las lluvias en las áreas con andosoles contribuye, sin duda, a la alta acidez de estos suelos. Aparentemente, el pH de los andosoles está fuertemente estabilizado alrededor del punto isoeléctrico, pH 5.0, debido a la presencia de alófono y compuestos amorfos de aluminio.

El contenido total del fósforo también depende de la textura y del contenido de materia orgánica de los suelos; cuanto más fina es la textura mayor es el contenido de fósforo total, y al aumentar la concentración de materia y fosfatos orgánicos en los suelos, se obtiene una mayor cantidad de fósforo total (Fassbender y Bornemisza 1987).

Los suelos pertenecientes al grupo de los andosoles alcanzan los valores más altos de fósforo total registrados en la literatura. En los suelos más ácidos, en los que predominan los fosfatos orgánicos y, dentro de los inorgánicos los de aluminio y hierro, el contenido de fósforo total fue mayor (Fassbender y Bornemisza 1987).

En un estudio de retención de fósforo en suelos derivados de cenizas volcánicas en América Central, Fassbender (1969), encontró que ésta correlaciona significativamente con el porcentaje de arcillas, carbono total, hierro y aluminio extraíbles. Asimismo, la precipitación de los fosfatos es más importante que su adsorción. La precipitación como fosfatos de aluminio y fierro son las causas principales de la fijación.

Los suelos del grupo ando se caracterizan por su capacidad de reaccionar rápidamente con grandes cantidades de fósforo, particularmente bajo condiciones ácidas. Consecuentemente, la disponibilidad de fósforo de los fertilizantes fosfatados solubles para las plantas es fuertemente reducida, y solo alrededor del 10% de fósforo aplicado al suelo suele ser aprovechado por los cultivos. La baja aprovechabilidad del fósforo tanto nativo como aplicado en los suelos del grupo ando es indudablemente uno de los factores más limitantes para la producción de cultivos en estos suelos (Egawa 1980).

Bornemisza y Pineda (1969), estudiando la mineralización del nitrógeno orgánico en suelos de orígenes diferentes, encontró una asociación lineal negativa que indica el efecto represivo de la alófana sobre la mineralización. Los andosoles presentaron una mineralización altamente significativa, menor que los demás suelos.

Es evidente que los andosoles y suelos aluvio volcánicos de Costa Rica son en general más deficientes en P, N, Ca y elementos menores, y menos deficientes en S, K y Mg. La gran deficiencia de N en los andosoles se debe a que, aún cuando la materia orgánica es alta, ésta no se descompone eficientemente por estar fuertemente fijada o estabilizada por los minerales amorfos. La deficiencia de fósforo en los andosoles se debe a la alta capacidad de fijación de este nutriente asociado con la gran actividad de aluminio. Deficiencias de Ca y elementos menores pueden tener su explicación en la composición química y mineralógica de las cenizas volcánicas (Martini 1970).

La actividad del aluminio puede ser controlada mediante la adición ya sea de cal o fertilizantes fosfatados, ambos mejoradores aportan calcio. La cal eleva el pH del suelo y con ello, inactiva al aluminio precipitándolo como hidróxido. Los fertilizantes fosfatados inactivan el aluminio al formar

fosfatos de aluminio. La aplicación de cal es uno de los tratamientos químicos básicos para inactivar el aluminio, debido a que resulta más económico que la aplicación de fertilizantes fosfatados (Okajima 1980).

Tanto el pH como el porcentaje de saturación de bases son indicadores poco confiables del requerimiento de cal de estos suelos, los cuales tienden a responder poco a la aplicación de cal, a menos que la acidez cambiante sea muy alta. Por el contrario el encalado, puede causar deficiencia, especialmente de algunos elementos menores, debido a las grandes cantidades necesarias para corregir un pH tan fuertemente estabilizado. Los andosoles responden bien, bajo condición de campo y en cultivos anuales a las aplicaciones de nitrógeno y fósforo (Martini 1969).

Tineo (1992b) trabajando en invernadero con suelos de San Juan Sur, mediante la técnica del elemento faltante, clasifica la deficiencia de nutrimentos, como primera aproximación, en dos grupos:

elementos críticos de primer orden : P y Ca; y

elementos críticos de segundo orden: N, K, S y Mg.

III. MATERIALES Y METODOS

3.1 Características del area de estudio.

Ubicación.

El experimento se realizó en la Estación Experimental Huerto Latinoamericano de Arboles Fijadores de Nitrógeno del Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE), ubicado en el Distrito de San Juan Sur, Cantón de Turrialba, Provincia de Cartago (Fig 3.1). El lugar está a una altitud de 950 msnm; sus coordenadas geográficas son 09° 53' de latitud Norte y 83° 38' de longitud Oeste.

Clima.

Los datos obtenidos de la Estación Meteorológica del CATIE (Jiménez 1993) indican para la zona una precipitación media de 2623 mm*año⁻¹ (promedio de 44 años), temperatura media de 21.54 °C (promedio de 25 años), y humedad relativa media de 87.84 % (promedio de 25 años). Si se corrigiera esta temperatura por gradiente de altitud se podría estar hablando de una temperatura media de 19.5 °C para San Juan Sur; de esta forma la zona de vida, según Holdridge (1987), corresponde a un bosque muy húmedo - Premontano (bmh-P).

El lugar cuenta con un pluviómetro y un pluviógrafo instalados en diciembre de 1990. Para el período comprendido entre octubre de 1991 y setiembre de 1992 se registró una precipitación de 2475 mm (Lebeuf 1993). Asimismo para el período que comprendió el presente estudio (setiembre de 1992 a agosto de 1993) la precipitación fue de 2561 mm.

Suelo.

Según Aguirre (1971), los suelos pertenecen a la serie Birrisito, orden inceptisol y suborden andept, con buena profundidad, bastante desarrollados y bien drenados.

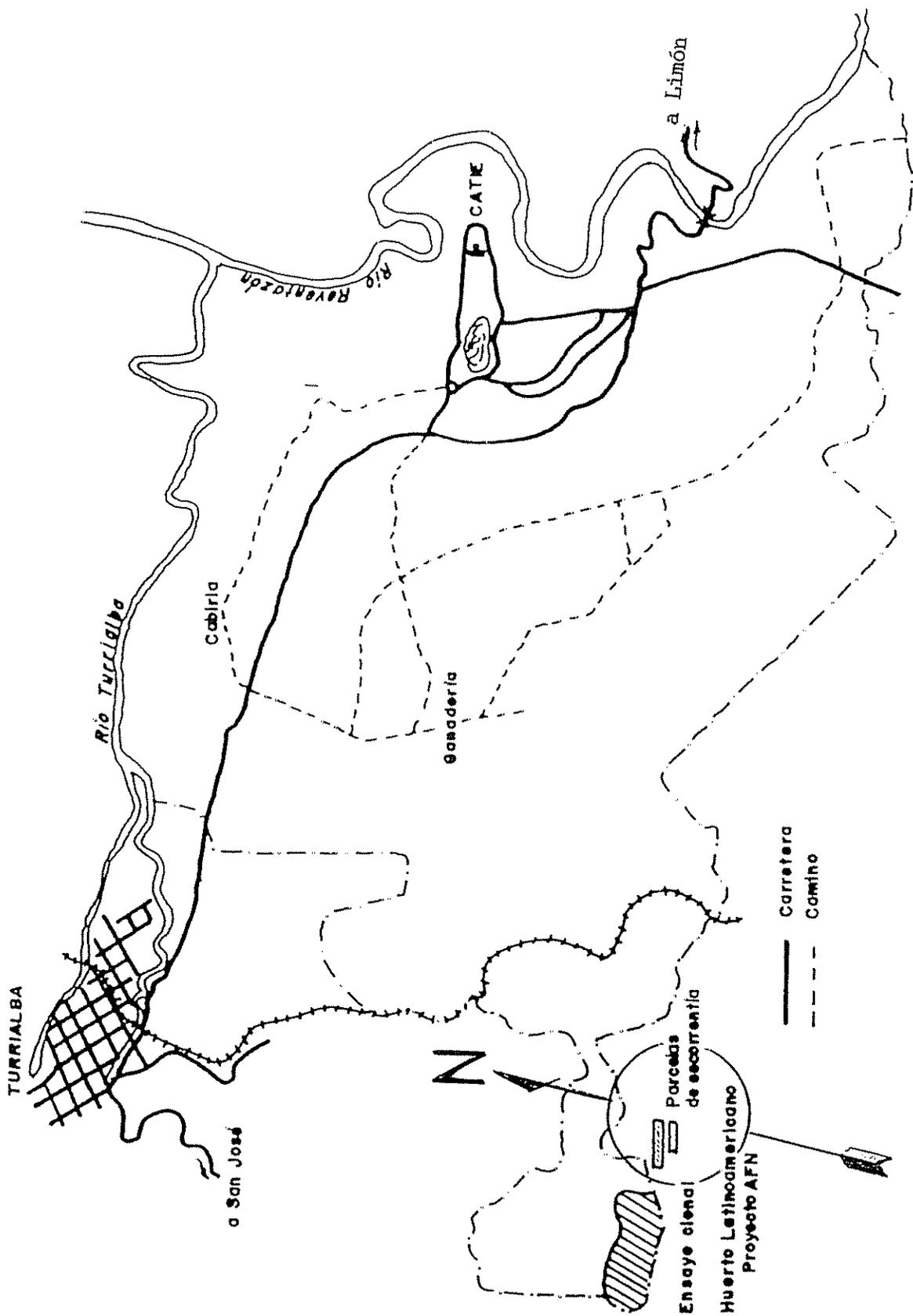


FIG 3.1 Plano del CATIE y localización de las parcelas de escorrentía en el Huerto Latinoamericano del Proyecto AFN.

Por otro lado, debido a los cambios que permanentemente se hacen al sistema de clasificación taxonómica del USDA, Kass, lo clasifica como Andisol Typic Fulvudand, con mucha materia orgánica, pero no de color oscuro (Garzón 1991).

Lebeuf (1993) citando a Luzuriaga (1970) y Aguirre (1971), menciona las características siguientes para las tierras de San Juan Sur:

- anteriormente existía un bosque muy húmedo. Hay un buen drenaje superficial y algo excesivamente drenado para el drenaje interno. No hay evidencia visible de erosión provocada por el pastoreo; la influencia humana es ligera.

- los valores de densidad aparente son bajos, inferiores a 1 g/cc, y tienden a aumentar con la profundidad (0.47 g/cc a 0.74 g/cc) debido a la disminución de la porosidad (82% a 69%) causada por la presencia de cantidades más altas de limo y arena. La retención de humedad es alta, disminuye con la profundidad debido a la baja notable del contenido de alófono.

- el pH determinado en agua tiende a ser fuertemente ácido (5.4), incrementándose la acidez con la profundidad (5.1), porque los horizontes B y C son maduros y han sufrido lixiviación de bases; esto lo demuestra la pobreza casi absoluta en calcio y magnesio totales y cambiabiles de estos suelos.

- el contenido de materia orgánica en el horizonte A es muy alto (23%) y concuerda con el alto contenido de alófono en este horizonte, el cual tiene capacidad de fijarla. En los horizontes B y C el contenido de materia orgánica baja drásticamente (2.5%) al igual que el material alófono; se trata de horizontes maduros, hubo una notable cristalización de la alófana a minerales arcillosos principalmente del tipo 1:1 por las condiciones de acidez.

- la relación C/N resulta alta (± 15) posiblemente por la alta cantidad de alófana que fija la materia orgánica y no se mineraliza. La Capacidad de Intercambio Catiónico dependiente

del pH, alcanza valores altos en el horizonte superior (70 meq/100 g) y disminuye con la profundidad (30 meq/100 g).

- el porcentaje de saturación de bases es bajo ($\pm 0.5\%$) por tratarse de suelos que debido a la precipitación pluvial han sufrido un lavado general del perfil.

- el contenido de aluminio extraíble es alto y tiende a aumentar con la profundidad (2.11 a 6.33 meq/100 g), especialmente en el subsuelo donde la meteorización es más avanzada. Este aumento está de acuerdo con la disminución de pH. El fósforo disminuye con la profundidad (2.13 a 0.56 ppm) y se debe al aumento de aluminio extraíble que fija en forma de fosfatos de aluminio.

- el contenido de alófana disminuye con la profundidad (41.6 % a 17.1 %), lo que hace pensar que debido a una meteorización avanzada de los horizontes inferiores, la alófana se transformó en arcillas cristalinas. Otra evidencia del grado de meteorización es el alto contenido de hierro y óxidos de hierro ($\pm 6\%$) juntamente con el aluminio extraíble.

Historia.

Dos trabajos preliminares se realizaron en este lugar; el primero con el objetivo de estudiar la pérdida de suelos por efecto de la erosión hídrica (Garzón 1991), y el otro con el objetivo de definir la tecnología más apropiada y más accesible al agricultor de tierras de ladera con escasos recursos económicos (Lebeuf 1991).

El área presentaba suelos cuyas características (pH bajo y alta saturación de aluminio) lo calificaron como marginal. Ante esta situación surgió la idea de investigar el comportamiento de algunos sistemas agroforestales para la conservación de suelos. Se seleccionó el cultivo en callejones y se comparó con el cultivo bajo cobertura de material vegetal muerto, para probar el efecto de éstas en la producción de granos en una rotación frijol-maíz.

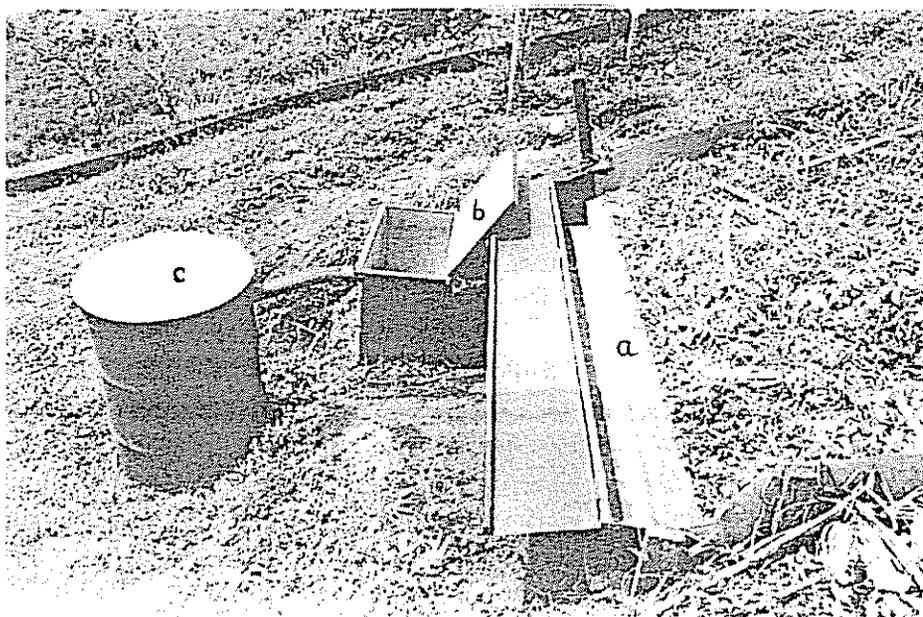
Las características químicas del suelo, antes indicadas, sugirieron la aplicación de cal (2.6 t/ha) para corregir el problema de la acidez del suelo y mejorar la disponibilidad de nutrimentos; luego se aplicó para el frijol una fertilización básica de 50-50-50 kg/ha de N, P₂O₅ y K₂O, respectivamente. No se aplicó fertilizantes para el maíz, ya que en estos sistemas se hace posible el uso mínimo de insumos.

En el primer año, los tratamientos con cobertura foliar de tejido vegetal (MInga y MErythrina) recibieron 105.6 kg del material (16 t/ha), tanto en el cultivo de frijol como en el de maíz. En el segundo año se aplicó la misma cantidad para el frijol, mientras que para el maíz se redujo a la mitad. Esta disminución se realizó porque aproximadamente la mitad del material utilizado como cobertura todavía no estaba descompuesto, sobre todo las parcelas con *Inga edulis* que presentaban un espesor considerable de hojarasca sin descomponer (Lebeuf 1993).

3.2 Descripción del experimento.

Parcelas de escorrentía.

Las parcelas de escorrentía (parcela útil) utilizadas en el presente experimento tienen las características siguientes: 2 m de ancho, 22 m de largo y 15 cm de altura. En la parte inferior de éstas se cuenta con un sistema recolector compuesto por una canoa para captar el material erosionado, una caja para recolectar el agua de escorrentía y, estañones auxiliares (uno o dos) para recibir el agua de escorrentía cuando éste supera la capacidad de la caja. Las cajas son de 0.6 m * 0.4 m * 0.3 m de largo, alto y ancho respectivamente; Los estañones tienen 60 cm de diámetro y una altura de 50 cm el primero y 120 cm el segundo (Fig 3.2).



- a. canoa: para recolección de sedimentos
- b. caja: para recolección del agua de escorrentía
- c. estafón: para recolección del agua de escorrentía

Fig 3.2. Detalle del sistema colector de una parcela de escorrentía.

El área total de las parcelas correspondientes a los tratamientos 1, 4 y 5 fueron de 3 m * 23 m, y para los tratamientos 2 y 3 (cultivos en callejones), de 7 m * 23 metros.

Diseño experimental y Tratamientos.

Las parcelas de escorrentia fueron instaladas el 1 de junio de 1990 (Garzón 1991) utilizando como criterio para el bloqueo el valor promedio de la pendiente del terreno. De este modo el experimento se adaptó a un diseño de bloques completos al azar (DBA), constituido de seis tratamientos repetidos en tres bloques (Figs. 3.3 y 3.4): Bloque A (15% de pendiente), bloque B (25%), bloque C (35%).

Los tratamientos considerados para el presente estudio fueron los siguientes (Fig 3.5):

- 1: cultivo con manejo tradicional (Testigo);
 - 2: cultivo en callejones de cuatro metros (CCallejón-4m);
 - 3: cultivo en callejones de seis metros (CCallejón-6m);
 - 4: cultivo con cobertura foliar de *Inga edulis* (MInga);
 - 5: cultivo con cobertura foliar de *Erythrina fusca* (MErythrina);
 - 6: terreno desnudo.
- El cultivo se refiere a una rotación frijol-maíz
 - La distancia entre árboles dentro de hileras es de 50 cm.
 - La cobertura foliar se aplicó superficialmente.

Conducción del experimento.

El presente experimento se inició el 1 de octubre de 1992. A partir de esa fecha se realizó diariamente la toma de datos de precipitación y escorrentía y la recolección de sedimentos en las parcelas correspondientes.

ENSAYO CLONAL
AFN

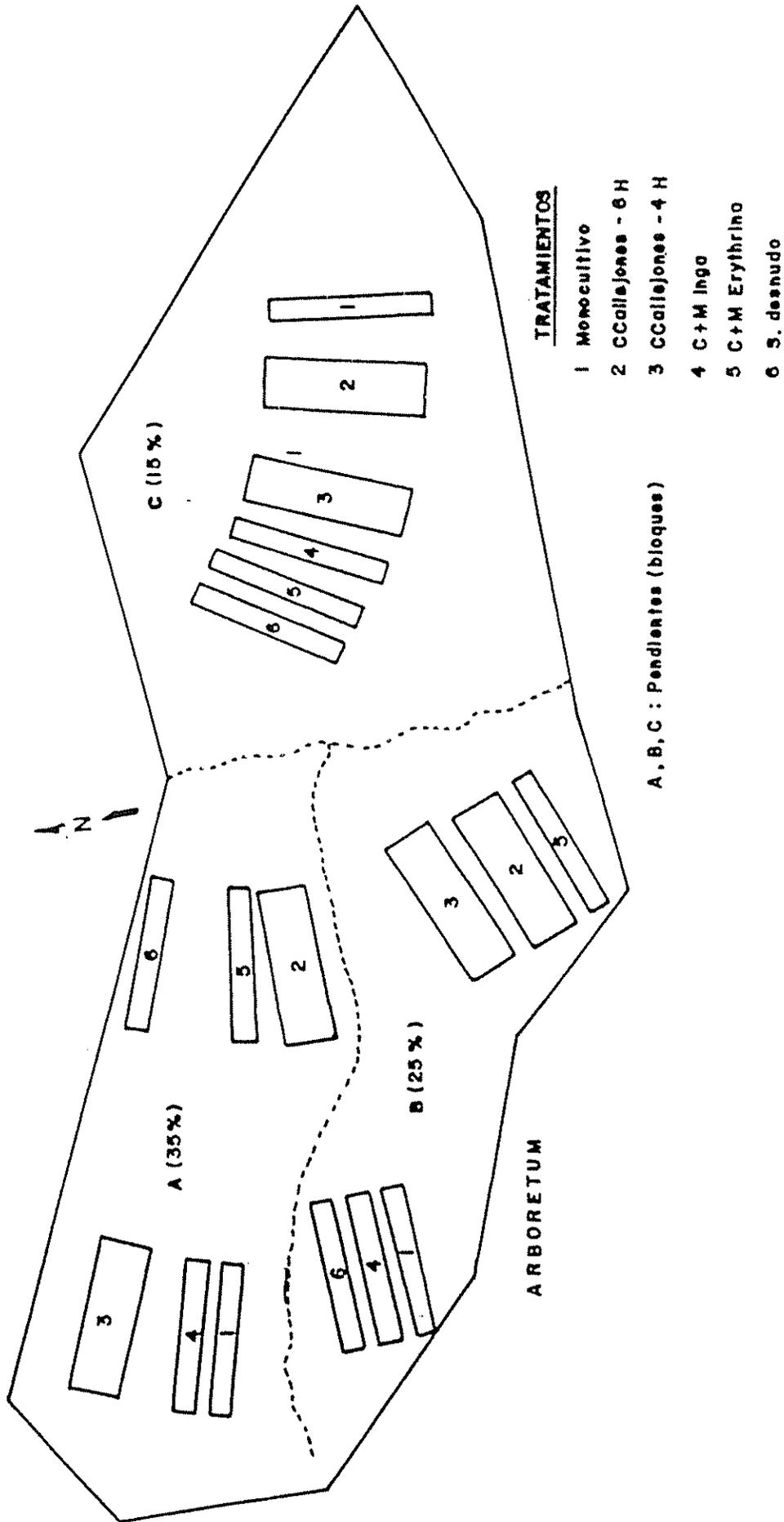


FIG 3.3 Plano de lote experimental. Disposición de bloques y tratamientos.
Exp. San Juan Sur, Turrilaibo.

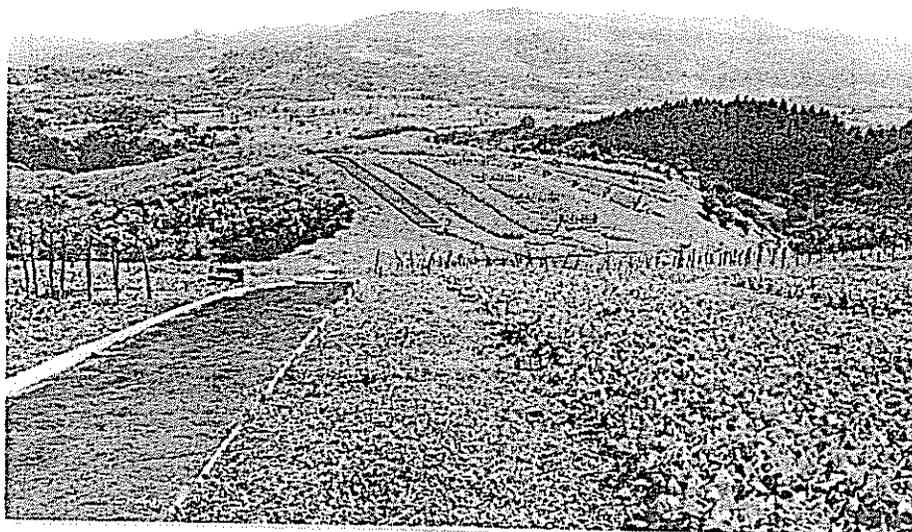


Fig 3.4. Aspecto general del lote experimental.



Fig 3.5 Disposición de tratamientos en el bloque C.

Con la finalidad de mantener el objetivo básico de los dos trabajos anteriores, en cuanto al uso de insumos, se procuró dar el manejo cultural apropiado para obtener cosechas con el mínimo de labranza y de agroquímicos.

Las semillas de frijol (var. Negro Huasteco) y maíz (var. Tuxpeño) utilizadas en el presente experimento, fueron obtenidas del almacén de semillas del Proyecto Arboles Fijadores de Nitrógeno (AFN)/SAREC, las mismas que se encontraban en buen estado de conservación y con porcentaje de germinación alto, superior al 95%.

- Cultivo de frijol.

Con la finalidad de eliminar las malezas que invaden el terreno durante el periodo en que descansa el terreno, dos semanas y media antes de la siembra de frijol se aplicó el herbicida Round-up a razón de 200 cc por bomba de 17 l. Se utilizaron nueve bombas para todas las parcelas.

El 10 de diciembre se aplicó la cobertura muerta de hojas de *E. fusca* en las parcelas A5, B5 y C5, a razón de 52.8 kg por parcela (8 t/ha); este material se obtuvo de un cerco vivo entre la carretera y el Huerto Latinoamericano de AFN, en San Juan Sur. El 11 de diciembre se aplicó la misma cantidad de tejido foliar de *I. edulis*, como cobertura en las parcelas A4, B4 y C4; Esta especie se obtuvo en el Campo Experimental Cabiria del CATIE, proveniente de ensayos agroforestales, en donde se utiliza como árbol de sombra para el cultivo de cacao.

Entre el 14 y 17 de diciembre se realizó la siembra del frijol a 40 cm entre surcos y 25 cm entre golpes. En cada golpe se depositaron cuatro semillas acompañadas de unos granos del insecticida Furadán, equivalente a unos 20 kilogramos por hectárea. Para realizar esta operación se

utilizaron cuerdas de plástico previamente marcadas, dos longitudinales para identificar la distancia entre surcos y otras transversales para señalar las distancias entre golpes; de este modo se consiguió uniformidad en la siembra.

En las parcelas correspondientes a los cultivos en callejones (tratamientos 2 y 3), el primer surco se ubicó a 80 cm de la hilera de árboles. De este modo se sembraron siete surcos de frijol en cada callejón del tratamiento 2 y doce surcos en cada callejón del tratamiento 3.

A partir del 18 de diciembre empezaron a emerger las primeras plantitas de frijol. El 21 de diciembre se aplicó cebo contra babosas (*Diplosolenodes* spp o *Sarasinula* spp) en las parcelas con coberturas de tejido vegetal, ya que era notoria su presencia, perjudicial para el cultivo cuando está tierno. El 22 de diciembre se realizó la resiembra en algunos golpes que no tuvieron adecuada germinación.

Entre el 8 y 9 de enero de 1993, se realizó la poda de hojas y ramas de las hileras de árboles en los cultivos en callejón. Previo a esta operación se hizo la medición de algunos parámetros de desarrollo de los árboles y la cuantificación del material que se aplicó como cobertura muerta en las parcelas correspondientes.

El raleo para dejar dos plantas por golpe, se realizó después de cuatro semanas de sembrado el frijol, entre el 11 y el 13 de enero. Esta operación consistió en extraer con cuidado el exceso de plantas de cada golpe dejando, en lo posible, las dos mejores.

En vista del pobre desarrollo de los árboles, se decidió fertilizar el terreno a nivel de las hileras de árboles, aplicando $MgSO_4$ a razón de 1.08 kg por hilera en el

tratamiento con cuatro hileras de árboles (CC-6m), y 720 g por hilera en el tratamiento con seis hileras de árboles (CC-4m). Estas cantidades de fertilizante, aplicadas por hilera de árboles, son equivalentes a 25 kg de Mg por hectárea.

El 21 de enero se realizó un muestreo de suelos en cada parcela con la finalidad de evaluar el estado de fertilidad del mismo. Cada muestra estuvo compuesta por doce submuestras obtenidas de la capa superficial del suelo mediante un tomamuestras cilíndrico de una pulgada de diámetro; de esta forma no se alteró el terreno.

El desarrollo del cultivo hasta la floración fue normal. A partir del 1 de febrero empezó la fructificación en algunos tratamientos. Para evitar la competencia con el cultivo, se realizó la limpieza de malezas en forma manual desde el 3 de febrero en la parcela A3, donde desarrollaron más, hasta el 15 de febrero, en las parcelas A1, B4 y B5. En las parcelas desnudas se eliminaron, utilizando 70 cc de Round-up en 5 l de agua.

Entre el 1 y 2 de marzo se realizó el muestreo de madurez fisiológica, con lo cual se efectuó el análisis de extracción de nutrimentos. La evaluación del rendimiento obtenido en cada parcela se hizo entre el 12 y 15 de marzo.

- Cultivo de maíz.

Como en el caso del frijol, dos semanas antes de la siembra de maíz se aplicó el herbicida Round-up a razón de 200cc por bomba de 17 l, utilizando nueve bombas para todas las parcelas.

El 30 de abril se aplicó hojas de *I. edulis* como cobertura vegetal muerta, en las parcelas A4, B4 y C4, a razón de 52.8 kg por parcela (8 t/ha). Este material también se consiguió en

el Campo Experimental Cabiria del CATIE. La cobertura de *E. fusca* se aplicó el 3 de mayo en las parcelas A5, B5 y C5, en la misma cantidad indicada para el caso de *I. edulis*; este material se obtuvo de árboles existentes en el huerto latinoamericano de AFN.

Entre el 10 y 11 de mayo se sembró el maíz a 80 cm entre surcos y 50 cm entre golpes. En cada golpe se depositaron tres semillas acompañadas de unos granos del insecticida Furadán, lo que equivale a cinco kilogramos por hectárea. Esta operación se realizó utilizando como guía cuerdas de plástico, marcadas con pintura; se usaron dos cuerdas longitudinales para identificar la distancia entre surcos y otras transversales para señalar las distancias entre golpes. De este modo se consiguió uniformidad en la siembra.

En las parcelas correspondientes a los cultivos en callejón de seis hileras (tratamiento 2, A2, B2 y C2), el primer surco se ubicó a 80 cm de la hilera de árboles. De este modo se sembraron cuatro surcos de maíz en cada callejón. En las parcelas de cuatro hileras de árboles (tratamiento 3) el primer surco se sembró a 1 m de la hilera de árboles, obteniéndose seis surcos de maíz en cada callejón.

A los cinco días después de siembra se observó una germinación que alcanzó al 99% del área sembrada. Dos días después se observó que algunas plantitas (aproximadamente 5%) estaban cortadas, detectándose la presencia de unas larvas. Inmediatamente se procedió a resembrar en los golpes afectados por estas larvas y en los que no habían germinado.

No se aplicó ningún agroquímico porque se consideró que el nivel de daño en las plantas, provocado por estas larvas, aún no era crítico.

Entre el 20 y 21 de mayo se instalaron lisímetros (uno en cada parcela) con la finalidad de estudiar las pérdidas de nutrimentos del suelo por lixiviación. Estos instrumentos se colocaron en hoyos de 70 cm de profundidad preparados con un barreno tomamuestras de percusión (Figs. 3.6, 3.7, 3.8), de diámetro ligeramente menor al del lisímetro. Estos instrumentos fueron utilizados hace seis años por Imbach (1987), quien manifiesta que se puede utilizar en cualquier condición ecológica en el trópico.

Dos semanas después de siembra se observó, en algunas plantas, señales de ataque de insectos del género *Diabrotica*, que alcanzaban a afectar el 5% de toda la planta; sin embargo, por considerar como bajo el nivel de daño, se decidió no aplicar ningún agroquímico. Las plantas continuaron con su crecimiento aparentemente normal.

Entre el 24 y 25 de mayo se realizó la poda de hojas y ramas de las hileras de árboles en los cultivos en callejón. Previo a esta operación se realizó la medición de algunos parámetros de desarrollo de los árboles y la cuantificación de la cantidad de mulch que se aplicó en la parcela.

El raleo para dejar dos plantas por golpe, se realizó después de cuatro semanas de sembrado el maíz, entre el 1 y el 3 de junio. Esta actividad se ejecutó extrayendo con cuidado el exceso de plantas de cada golpe y dejando en pie las dos mejores plantitas.

Después de 50 días de cultivo, las plantas presentaron buen nivel de crecimiento, sobre todo en las parcelas con coberturas y en algunos cultivos en callejón. Sin embargo, a medida que transcurría el tiempo se observaron diferencias importantes en el crecimiento y desarrollo del maíz, las mismas que se reflejaron en los rendimientos obtenidos.



Fig 3.6. Instalación de lisímetros:
Preparación del hoyo con un barreno tomamuestras



Fig 3.7. Instalación de lisímetros:
Colocación del lisímetro a 70 cm de profundidad.



Fig 3.8. Lisímetro en una parcela con cobertura de *I. edulis*.

3.3 Variables y metodología para la toma de datos.

Rendimiento de los cultivos.

- Rendimiento del frijol.

Para determinar el rendimiento de este cultivo se tomó una muestra sobre un área de 12 m² en la parte central de la parcela útil. De esta forma la muestra consistió de 120 golpes.

En las parcelas con cobertura (tratamientos 4 y 5) y tradicional (tratamiento 1), correspondió a 20 surcos (8 m) y seis golpes por surco (1.5 m). En el cultivo en callejón de seis hileras, se cosecharon seis golpes por surco (1.5 m) en dos callejones completos (20 surcos). En el cultivo en callejón de cuatro hileras, se cosechó la totalidad de golpes (8) en el callejón central y en los surcos adyacentes a la hilera de árboles (15 surcos).

La operación de muestreo se realizó arrancando del suelo la planta completa. Estas se trasladaron a un ambiente en donde se procedió a la separación del grano para permitir su secado sobre bolsas identificadas de acuerdo a los tratamientos. El peso de los granos se realizó utilizando una balanza en el laboratorio de suelos. Al mismo tiempo se determinó la humedad del grano secando en la estufa, durante 48 horas, un peso conocido de granos con la humedad de cosecha; Los cálculos se realizaron utilizando la relación siguiente:

$$\%H^{\circ} = (Ph - Ps) * 100 / Ph \quad \dots\dots (3.1)$$

donde :

%H°= porcentaje de humedad del grano cosechado

Ph = peso del grano con humedad de cosecha

Ps = peso del grano después de secado en la estufa

Para representar el rendimiento de frijol a 14% de humedad, se realizó la transformación de los pesos anteriores utilizando las fórmulas siguientes:

$$\text{Rdto (g)}_{14\% \text{ H}} = \frac{(100 - \% \text{ humedad leída}) * (\text{peso total grano})}{86}$$

$$\text{Rdto (kg/ha)}_{14\% \text{ H}} = \text{Rdto (g)}_{14\% \text{ H}} * \frac{10000 \text{ m}^2}{\text{ha} * 12 \text{ m}^2} * \frac{1 \text{ kg}}{1000 \text{ g}}$$

- Rendimiento del maíz.

El rendimiento de este cultivo se determinó tomando una muestra sobre un área de 16 m², en la parte central de la parcela útil. De esta forma la muestra consistió de 40 golpes.

En todos los tratamientos, los 40 golpes correspondieron a 10 surcos completos de la parcela útil. En los tratamientos con cobertura y tradicional se cosecharon 10 surcos de la parte central de la parcela. En el cultivo en callejón de seis hileras (trat. 2), se cosechó en los surcos de dos callejones (tercer y cuarto) completos y dos surcos adyacentes a la hilera inferior de árboles del cuarto callejón. En el cultivo en callejón de cuatro hileras (trat. 3), se cosechó en el callejón central y en cuatro surcos adyacentes a la hilera inferior de árboles del callejón central.

La operación de muestreo se realizó arrancando las mazorcas de las plantas. Estas se trasladaron a un ambiente en donde, después de clasificarlos en buenas y malas, se procedió al secado sobre bolsas identificadas de acuerdo con los tratamientos. El peso de la mazorca (granos y olote) se realizó utilizando una balanza digital en el laboratorio de suelos. Paralelamente se determinó la humedad del grano como en el caso del frijol, utilizando una muestra de granos de peso conocido, la misma que se secó hasta peso constante, en una estufa a 105 °C de temperatura.

Para representar el rendimiento de maíz a 15% de humedad, se transformaron los pesos anteriores utilizando las relaciones siguientes:

$$\text{Rdto (g)}_{15\% \text{H}} = \frac{(100 - \% \text{ humedad leída}) * (\text{peso total de granos})}{85\%}$$

$$\text{Rdto (kg/ha)}_{15\% \text{H}} = \text{Rdto (g)}_{15\% \text{H}} * \frac{10000 \text{ m}^2}{\text{ha} * 16 \text{m}^2} * \frac{1 \text{ kg}}{1000 \text{ g}}$$

Pérdida de suelos y nutrientes por erosión.

A partir del mes de octubre de 1992 hasta el último día de setiembre de 1993 se realizó la recolección diaria del material erosionado (sedimentos). Esta operación consistió en recolectar los sedimentos encontrados en la canoa y caja de cada parcela, utilizando bolsas de plástico identificadas con la fecha de recolección y el número de tratamiento. Las bolsas con los sedimentos correspondientes a un día se depositaron en una bolsa más grande; En esta forma se trasladaron al laboratorio donde se abrieron para permitir su secado al aire durante algunos días.

Una vez secos los sedimentos, se procedió a pesarlos con una balanza digital de precisión. Paralelamente se determinaron sus contenidos de humedad para corregir los pesos anteriores a peso seco; Esta consistió en pesar una muestra pequeña del sedimento, someterlo a secado en una estufa a 105 °C durante 48 horas, y volverlo a pesar. El contenido de humedad se calculó con la relación (Tineo 1992a):

$$\% \text{ H} = (\text{Pssa} - \text{Psse}) * 100 / \text{Psse} \quad \dots \quad (3.2)$$

donde:

% H = porcentaje de humedad en el sedimento

Pssa = peso del sedimento secado al aire

Psse = peso del sedimento secado a la estufa

La corrección a peso seco (Pss), de los sedimentos, se realizó utilizando la siguiente relación:

$$Pss = Pssa / (1 + 0.01 * \% H) \quad \dots (3.3)$$

donde: Pss = peso de sedimento corregido por humedad.

Después de mezclar los sedimentos recolectados durante el año, se extrajo una muestra por parcela en las cuales se practicaron los análisis químicos respectivos en el Laboratorio de Suelos del CATIE. Estos resultados multiplicados por el total de suelo perdido en cada parcela corresponden a la masa de nutrimentos de suelo perdidos por erosión hídrica.

Pérdida de nutrimentos por escorrentía.

Después de cada evento se determinó el volumen de agua de escorrentía recolectada en la caja de cada parcela. Esta se realizó midiendo con una regla graduada la altura de agua alcanzada en la caja; este valor multiplicado por el área de la base del estañón equivale al volumen total de agua escurrida en la parcela. En algunos eventos con escasa lluvia, para estimar con mayor precisión la cantidad de agua escurrida, se utilizó una esponja con la que se absorbió el agua para luego depositarla con la ayuda de un embudo en una probeta.

Después de dos eventos seleccionados al azar se recolectaron muestras del agua de escorrentía e, inmediatamente, se llevó al Laboratorio de Suelos del CATIE en donde se hizo un análisis de su composición química. Las pérdidas de nutrimentos del suelo por escorrentía se calcularon relacionando, con una regla de tres simple, la concentración de nutrimentos en el agua con la cantidad de agua escurrida en cada parcela.

Pérdida de nutrimentos por lixiviación.

La pérdida de nutrimentos del suelo, por lixiviación, se determinó mediante muestreos de la solución del suelo con cápsulas lisimétricas colocadas en la parte central de cada parcela de escorrentía a una profundidad de 70 centímetros. Los lisímetros utilizados en este experimento constan de una cápsula de porcelana porosa de 20 mm de diámetro y 80 mm de largo, conectada al extremo de un tubo rígido de PVC de igual diámetro y 100 cm de largo. Al interior del tubo, y hasta la cápsula, corre un tubo flexible de 3 mm de diámetro que se utiliza para producir el vacío en el instrumento (Fig 3.9).

Para la aplicación de vacío y la extracción de la muestra de la solución del suelo, se empleó una bomba manual de vacío, con un manómetro incorporado para controlar el vacío fijado en 70 centibares. Las muestras de la solución de suelo con los nutrimentos lixiviados, obtenidos dos días después de aplicar el vacío, se refrigeraron inmediatamente hasta el inicio de su respectivo análisis en el laboratorio de suelos del CATIE.

Para el cálculo de la masa de nutrimentos lixiviados fue necesario conocer el volumen de agua percolada. Esta se estimó utilizando la ecuación general de balance hídrico (Maraux y Rapidel 1990b) entre dos fechas, descrita como:

$$P + R = E + D + ET + \delta H \quad \dots \quad (3.4)$$

donde:

P = agua proveniente de lluvias

R = agua proveniente de riego

E = agua que se pierde por escorrentía

D = agua que se pierde por drenaje o percolación

ET = agua evapotranspirada

δH = variación de la reserva de agua en el suelo

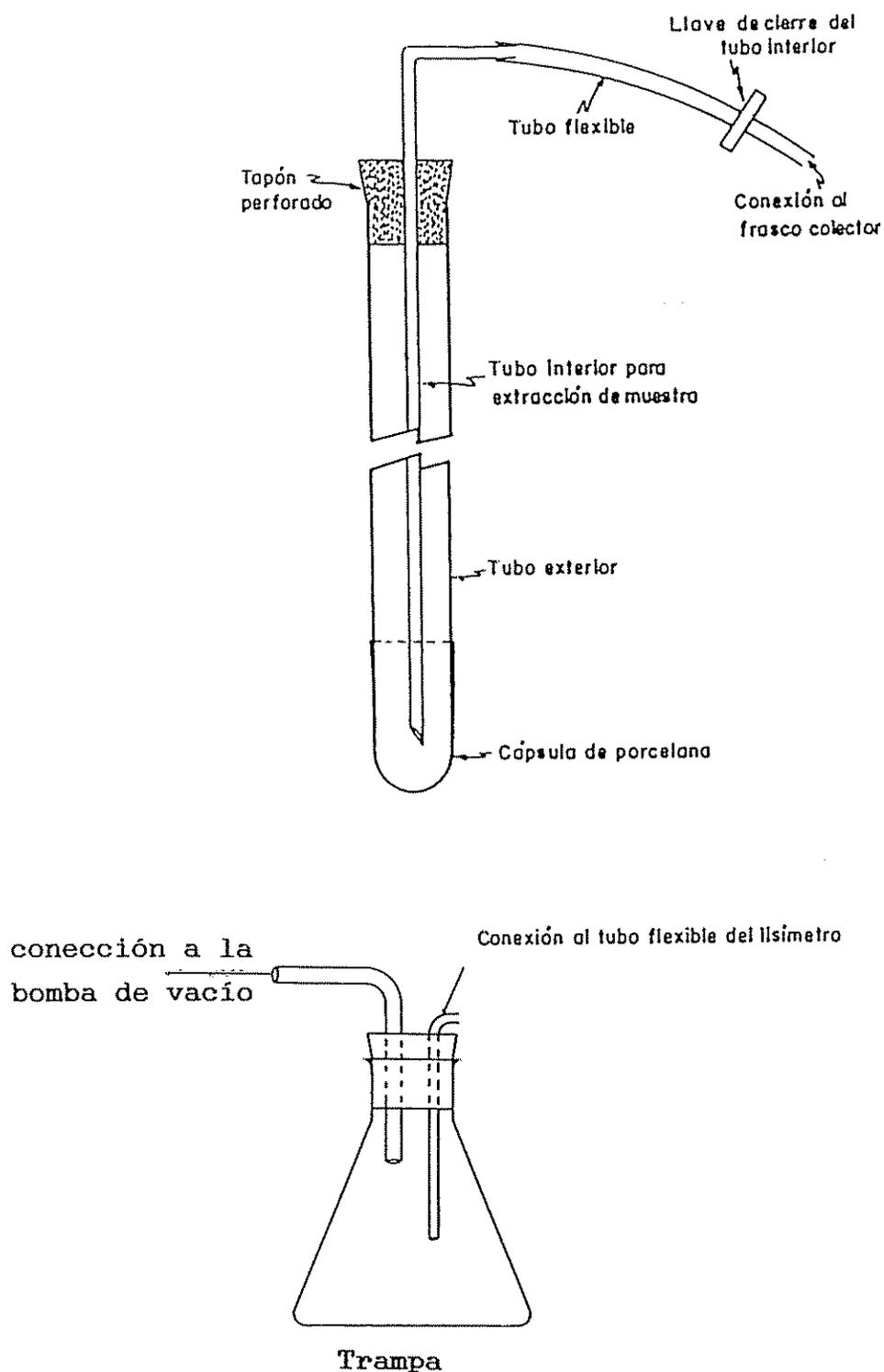


Fig 3.9. Esquema del lisímetro y accesorios para la toma de muestras de la solución de suelo.

En las condiciones del ensayo no se aplicó ningún tipo de riego. Por otro lado, el régimen de lluvias característico de la zona indica que estos suelos permanecen suficientemente húmedos durante todo el año, por lo que se puede considerar como nula la variación de la reserva de agua en el suelo entre el inicio y el final del período experimental. De esta forma la ecuación se reduce a la siguiente:

$$P = E + D + ET \quad \dots \quad (3.5)$$

Con esta relación simplificada se calculó la cantidad de agua percolada o drenada internamente (D), ya que eran conocidas las otras variables: la precipitación (P) medida con el pluviómetro o tomado de los registros pluviográficos, la escorrentía (E) medida directamente en las parcelas de escorrentía, y la evapotranspiración (ET) calculada con el método de Penman.

La cantidad de agua percolada, así estimada, al multiplicarla por la concentración de nutrientes en la solución de suelo obtenida por los lisímetros da como resultado la pérdida de nutrientes (N, P, K, Ca y Mg) del suelo por lixiviación.

Balance de nutrientes.

Con la finalidad de realizar un balance simple de los principales nutrientes del suelo, se cuantificaron las fuentes de entrada (aporte por las lluvias, aplicación de coberturas, residuos del cultivo después de la cosecha), y salida (lixiviación, escorrentía superficial, erosión hídrica, exportación por los cultivos). Para este análisis se procesaron datos obtenidos en el presente experimento y en los dos anteriores. El resultado indica la reserva potencial de cada uno de los nutrientes en los sistemas estudiados, puesto que no se considera el contenido inicial en el suelo.

Precipitación y escorrentía.

Se determinó el volumen generado por la lámina de agua de lluvia caída en el área de la parcela. Con los volúmenes de escorrentía medidos en las cajas de cada parcela se obtuvieron los coeficientes de escorrentía (E) para cada parcela, relacionando el primero de estos volúmenes respecto del segundo. Esta operación se efectuó para cada evento.

Estudio de algunos índices de erosión.

De los muchos procedimientos propuestos para estimar las pérdidas de suelo por erosión hidrica, la EUPS formulada por Wischmeier y Smith en 1962, es la que ha tenido mayor aceptación y difusión, no sólo en el continente americano sino también en los demás países con problemas de erosión (Gonzales del Tánago 1991). Esta ecuación es descrita por la relación:

$$A = R.K.L.S.C.P.$$

donde:

A = es el valor promedio de las pérdidas de suelo anuales (t/ha), en función de:

R = índice de erosividad de la lluvia;

K = índice de erosibilidad del suelo;

LS = factor de relieve;

C = factor de cubierta vegetal;

P = factor de prácticas de conservación de suelos.

Para el cálculo del índice de erosividad se analizó la información proveniente de las bandas registradoras del pluviógrafo. Tomando en cuenta el criterio de Wischmeier y Smith (1978), quienes consideran eventos o lluvias independientes a aquellas separadas por espacio mínimo de seis horas y entre las cuales no haya caído una cantidad superior a un milímetro.

El análisis de las bandas se realizó de la siguiente forma:

1. La lluvia registrada se dividió en tiempos parciales (δt) de intensidad constante y se anotó la altura de agua y el tiempo correspondiente a cada cambio de pendiente.
2. Se calculó la intensidad (mm/h) para tiempos parciales
3. Se calculó la energía instantánea (E_i) para cada intensidad (I) empleando la relación:

$$E_i = 210.3 + 89 * \log_{10} I$$

4. Se sumaron los valores de energía instantánea de cada aguacero, para obtener la energía cinética total (E) de un evento.
5. Se determinó el valor de la intensidad máxima en 30 minutos (I_{30}), seleccionando en el registro el período de 30 minutos donde ocurre la mayor cantidad de lluvia
6. Finalmente, del producto de la energía cinética total por la intensidad máxima en 30 minutos, se obtuvo el índice de erosividad (R), cuya expresión es:

$$R = E \cdot I_{30}$$

También se estudió un índice nuevo, al que se denominó índice modificado de Wischmeier (EI_{30m}). Esta se deriva del índice de Wischmeier, por medio de la relación siguiente:

$$EI_{30m} = EI_{30} * (30 / d)$$

donde:

EI_{30m} = índice modificado de Wischmeier

EI_{30} = índice de erosividad de Wischmeier

30 = tiempo para el cual se calculó la intensidad máxima

d = duración del evento (lluvia), para el cual se calculó EI_{30}

3.4 Procedimientos analíticos.

El análisis de los datos para evaluar el efecto de los tratamientos sobre las variables escorrentia (E) y material erosionado (S), se efectuó utilizando el modelo que corresponde al diseño planteado para este experimento; esto es:

$$Y_{ijk} = M + B_i + T_j + E_{ijk}$$

donde:

Y_{ijk} = k'ésima observación en el tratamiento j, bloque i;

M = media general;

B_i = efecto del bloque i (i = 1, 2, 3);

T_j = efecto del tratamiento j (j = 1, 2, ..., 6);

E_{ijk} = error correspondiente a la ijk'ésima observación.

El cuadro de ANDEVA correspondiente a este modelo es:

F de V	G.L.	S.C.	C.M.	Fc.
Bloques	2			
Tratamiento	6			
error	12			
Total	20			

Con el propósito de estudiar el comportamiento de la producción de granos de frijol y maíz, a través de los años, se realizaron los análisis estadísticos a los rendimientos y extracción de nutrimentos por estos cultivos, obtenidos en tres ciclos completos de rotación frijol-maíz. Se utilizó el diseño original (DBA) al que se le dió un arreglo en parcelas divididas en el tiempo; En éste, las parcelas grandes lo constituyen los tratamientos y las subparcelas los años. Los rendimientos correspondientes al primer año se tomaron de Garzón (1991), y los del segundo año, de Lebeuf (1993).

Para determinar la tendencia de los rendimientos y extracción de nutrimentos por los cultivos, a través del tiempo, se efectuó un análisis de efectos simples del tiempo en cada tratamiento, utilizando la técnica de los polinomios ortogonales (cuadro 3.2). Esto se consiguió descomponiendo los diez grados de libertad correspondientes a años (2) e interacción tratamiento por año (8) en diez contrastes ortogonales con un grado de libertad cada uno (Tineo 1993). De esta forma se prueban dos polinomios (lineal y cuadrático) para cada tratamiento. Como una curva de segundo grado pasa como mínimo por tres puntos (en este caso años), puede ser más apropiado referirse al último contraste como asociado a una respuesta no lineal o con falta de ajuste a una respuesta lineal, en vez de cuadrática (Steel y Torrie 1989).

Cuadro 3.2 Cuadro de ANDEVA para diseño completamente al azar con arreglo de parcelas divididas en el tiempo.

Fuentes	G.L.	S. C.	C. M.	Fc
Bloque	2			
Tratamiento	4			
error (a)	8			
Año	2			
Tratamiento * Año	8			
Testigo (lineal)	1	}		
Testigo (cuadr.)	1			
CC-4m (lineal)	1			
CC-4m (cuadr.)	1			
CC-6m (lineal)	1			
CC-6m (cuadr.)	1			
MInga (lineal)	1			
MInga (cuadr.)	1			
MErythrina (lineal)	1			
MErythrina (cuadr.)	1			
error (b)	20			
Total	44			

El modelo correspondiente a este diseño es:

$$Y_{ijk1} = M + B_i + T_j + E_{ijk} + D_l + T * D_{j1} + E_{ijk1}$$

Y_{ijk1} = k-ésima observación en el tratamiento j, bloque i; año k

M = media general;

B_i = efecto del bloque i (i = 1, 2, 3);

T_j = efecto del tratamiento j (j = 1, 2, ..., 6);

E_{ijk} = error de parcela grande

D_l = efecto del año l (l = 1, 2, 3);

$T * D_{j1}$ = interacción tratamiento j * por año l;

E_{ijk1} = error de parcela pequeña.

También se probaron modelos para explicar las pérdidas de suelo por erosión hídrica en las parcelas desnudas, por efecto del agua de lluvia. Las variables independientes (X), fueron la Intensidad máxima en 30 minutos, el Índice de Wischmeier (EI_{30}) y el índice modificado de Wischmeier (EI_{30m}); como variables dependientes (Y), el suelo perdido por erosión hídrica y el logaritmo del suelo perdido por erosión hídrica. Es decir los modelos a probar fueron los siguientes:

lineal: $Y = a + bX + e$

logarítmico: $\log Y = a + bX + e$

IV. RESULTADOS Y DISCUSION

4.1 Balance hídrico.

Precipitación.

La distribución de la lluvia (Fig 4.1) correspondiente al período de estudio (octubre 1992, setiembre 1993), muestra que ésta es superior a los 200 mm mensuales con excepción de los meses de noviembre de 1992, febrero y abril de 1993, en los que las cantidades de agua precipitada fueron de 95.6 mm, 71.2 mm y 71.0 mm respectivamente.

El criterio básico para determinar el momento para la siembra de los cultivos fue la presentación regular de las lluvias. Este, al compararse con la distribución de las lluvias, coincide con el primer mes inmediato posterior a un mes seco (noviembre para el frijol y abril para el maíz). Así, el frijol se sembró entre el 14 y 17 de diciembre porque en estos días se presentaron lluvias diarias más continuas; de igual forma, la siembra de maíz se realizó entre el 10 y 11 de mayo por la misma razón antes expuesta.

Evapotranspiración.

Con los datos de temperatura, radiación solar, humedad relativa y velocidad del viento tomados de la estación meteorológica del CATIE, se realizó el cálculo de evapotranspiración potencial (ETP) por el método de Penman. Para este propósito se utilizó el Programa ETP incluido en el paquete AGROCLIM (Maraux y Rapidel 1990b). Por la proximidad del CATIE a la localidad de San Juan Sur, se consideró a la radiación solar, humedad relativa y velocidad del viento como similares en ambos lugares; sin embargo, la temperatura se corrigió de acuerdo a una gradiente de altitud. Los gradientes de temperatura para regiones tropicales son de aproximadamente 0.5-0.7 °C por cada 100 metros de altitud (Frere et al 1975).

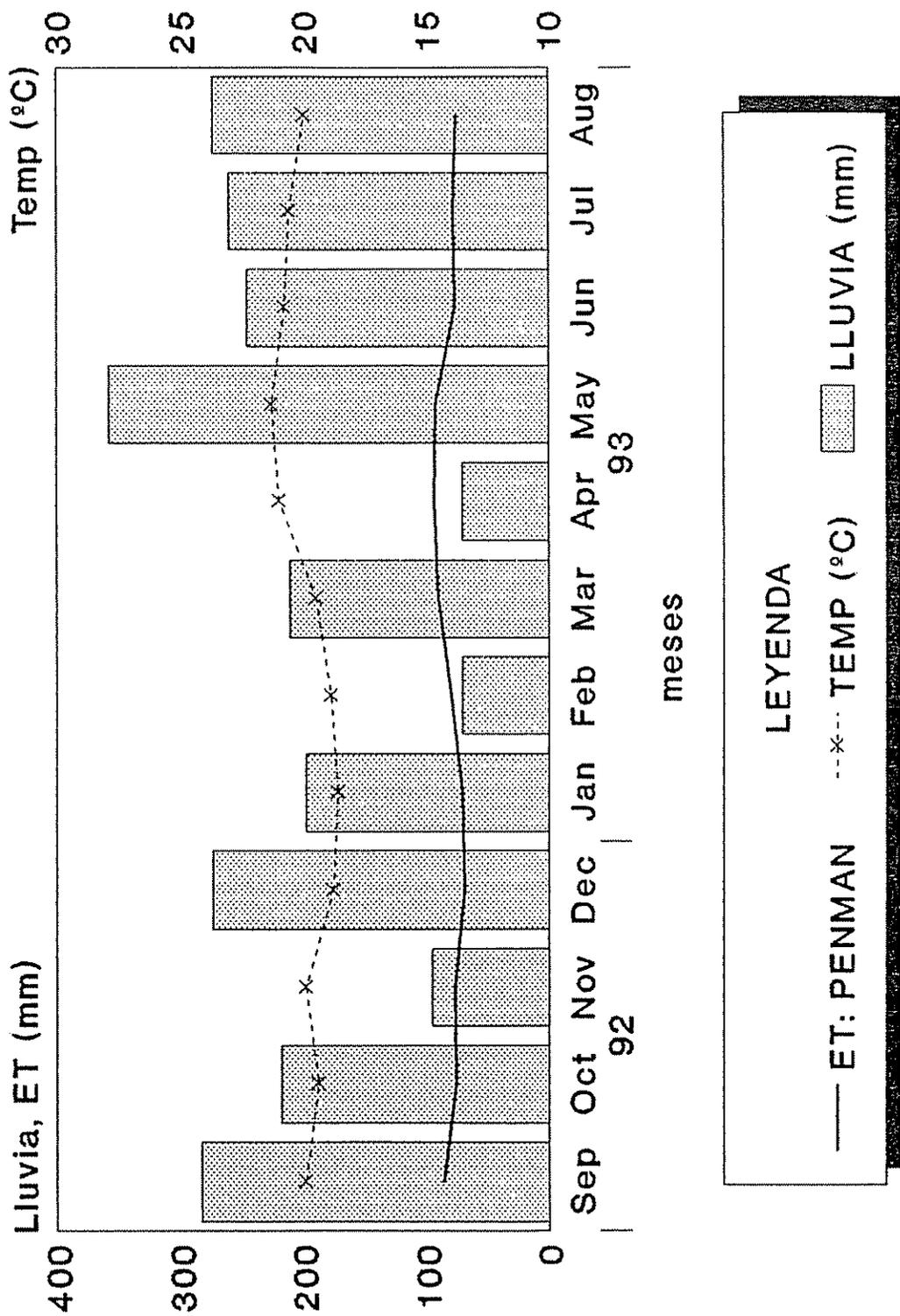


Fig 4.1 Diagrama climático de San Juan Sur, Turrialba (set 92 - ago 93)

La relación utilizada para corregir la temperatura por altitud fue la siguiente:

$$T^{\circ} \text{SJS} = T^{\circ} \text{CATIE} + 0.006 * \delta h \quad \dots \quad (4.1)$$

donde:

$T^{\circ} \text{SJS}$ = temperatura estimada para la estación de San Juan Sur

$T^{\circ} \text{CATIE}$ = temperatura registrada en la estación del CATIE

0.006 = gradiente de temperatura por altitud (0.6 °C por cada 100m)

δh = diferencia de altitud ($h_{\text{CATIE}} - h_{\text{SJS}}$) entre las estaciones CATIE y San Juan Sur.

Los resultados de estos cálculos (cuadro 4.1, Fig 4.1) muestran que la lámina de agua evapotranspirada supera ligeramente a la cantidad de lluvia en los meses de febrero y abril de 1993.

Cuadro 4.1 Distribución mensual de la evapotranspiración potencial (Penman) y precipitación en San Juan Sur, Turrialba (setiembre 1992 - agosto 1993).

Mes	set	oct	nov	dic	ene	feb	mar	abr	may	jun	jul	ago
T (°C)	19.9	19.4	19.9	18.8	18.6	18.9	19.5	21.0	21.3	20.8	20.6	21.6
Rad.	420.0	341.6	381.2	311.0	331.6	444.0	445.0	470.7	446.1	359.9	347.7	389.4
HR (%)	85.7	87.4	84.8	85.7	85.5	79.7	83.8	84.3	88.1	89.3	89.8	89.6
Vv(m/s)	0.55	0.48	0.54	0.44	0.42	0.56	0.58	0.32	0.30	0.28	0.26	0.26
ETP(mm)	85.7	75.9	77.1	68.6	71.2	80.3	91.4	94.5	92.8	77.3	77.9	85.3
PP(mm)	283.2	217.9	95.6	273.9	198.4	71.2	210.5	71.0	358.2	246.0	260.7	274.1

Escorrentía y pérdida de nutrimentos por escorrentía.

Los valores del agua de escorrentía para cada tratamiento (cuadro 4.2) indican que éstos son bajos en relación a la cantidad de agua llovida. Al expresarlos como coeficientes de escorrentía se observa que en promedio no superan al 1 %.

Cuadro 4.2 Lámina de agua escurrida (mm) y coeficientes de escorrentía por tratamientos. San Juan Sur, Turrialba (setiembre 1992 - agosto 1993).

Tratamiento	bloque A		bloque B		bloque C	
	lámina	coef.	lámina	coef.	lámina	coef.
Tradicional	11.07	0.0040	3.18	0.0012	10.52	0.0039
CC-4m	5.33	0.0020	37.50	0.0138	7.62	0.0028
CC-6m	8.82	0.0032	23.42	0.0086	34.32	0.0126
MInga	3.44	0.0013	4.90	0.0018	2.83	0.0010
MErythrina	3.09	0.0011	5.36	0.0020	3.34	0.0012
LLuvia	2726.43 mm.					

Los valores bajos de escorrentia posiblemente se deben a la alta permeabilidad de estos suelos, puesto que la tasa de infiltración (864 mm/h) y percolación (234 mm/h) son muy altos (Silvestre et al 1993).

A pesar de no existir diferencia significativa para la escorrentía entre los tratamientos estudiados, los valores más bajos corresponden a las coberturas, de *I. edulis* (0.137 %) y *E. fusca* (0.143 %), y los valores más altos al cultivo en callejones de seis metros (0.813 %).

Trabajando en las mismas parcelas Lebeuf (1993) encontró valores de escorrentia entre 0.04 % y 0.25 %; Por su parte Garzón (1991) reporta un rango más amplio (0.14 % a 6.27 %) considerando sólo las lluvias erosivas. Romero (1991) reporta 12.06 % en terrenos de 69 % de pendiente con cultivo de frijol y 19.45 % en suelo desnudo con 58 % de pendiente.

Los valores bajos de escorrentía encontrados parecen no tener importancia. Se destaca el efecto de las dos coberturas utilizadas en la protección del suelo contra el impacto directo de la lluvia (Morgan 1984), y si ocurren salpicaduras de partículas, actúan como filtro evitando una obturación de los poros superficiales del suelo (Berrios 1965).

Otro factor asociado a los valores bajos de escorrentía encontrados, son las mismas características de estos suelos: una alta porosidad, 82 % en la parte superficial, y 69 % en horizontes más profundos (Luzuriaga 1970 y Aguirre 1971 citados por Lebeuf 1993), y conductividad hidráulica rápida, 234 mm/h (Silvestre et al 1993). Smith y Browing citados por Forsythe et al (1969) clasifican la conductividad hidráulica (permeabilidad) en: muy rápida (> 250 mm/h), rápida (25 - 250 mm/h), moderada (2.5 - 25 mm/h), y lenta (< de 2.5 mm/h).

Percolación y pérdida de nutrimentos por lixiviación.

Utilizando la ecuación simplificada de balance hídrico (ecuación 3.5) descrita en el capítulo de materiales y métodos, se realizaron los cálculos para estimar la cantidad de agua perdida por percolación (cuadro 4.3). La masa de nutrimentos perdidos por lixiviación se calculó en base a la concentración de nutrimentos en el agua de escorrentía y la cantidad de agua perdida por percolación.

Cuadro 4.3 Pérdida de nutrimentos del suelo (kg/ha) por escorrentía y lixiviación, San Juan Sur, Turrialba (octubre 1992 - setiembre 1993).

Proceso		N	P	K	Ca	Mg
ESCORRENTIA	*					
Tradic.	8.8	0,039	0,006	0,055	0,060	0,018
CC-4m	18.8	0,106	0,016	0,159	0,156	0,051
CC-6m	25.7	0,569	0,020	0,437	0,370	0,116
MInga	3.9	0,042	0,004	0,043	0,035	0,012
MErythrina	4.3	0,051	0,008	0,100	0,036	0,010
LIXIVIACION	**					
Tradic.	1574	60,802	0,997	39,663	218,855	22,187
CC-4m	1564	48,149	0,731	22,134	154,671	13,846
CC-6m	1557	38,449	2,392	27,283	142,735	16,219
MInga	1579	42,675	0,869	42,368	177,394	15,528
MErythrina	1579	40,814	0,869	32,891	162,931	16,057
valor máximo		18,604	0,630	10,432	100,308	9,432
valor mínimo		108,514	5,848	65,491	362,173	29,484

* lámina de agua escurrida.

** lámina de agua percolada.

Las pérdidas por lixiviación así estimadas alcanzan en algunas parcelas hasta 108, 6, 65, 362, y 29 kg por hectárea de N, P, K, Ca y Mg, respectivamente. Estos valores son muy altos si se comparan con las pérdidas por escorrentía.

Para el caso del N, las pérdidas por lixiviación son aproximadamente 500 a 1000 veces mayores que las pérdidas por escorrentía, a excepción del cultivo en callejones de seis metros donde esta relación baja a unas 70 veces; El P, por lixiviación se pierde entre 50 a 200 veces más que por escorrentía; El K, de 50 a 1000 veces; El Ca, de 400 a 5000 veces; y el Mg, de 150 a 1500 veces.

Imbach (1987) trabajando en el campo experimental La Montaña del CATIE con sistemas agroforestales de laurel y poró combinados con café y cacao, reporta pérdidas de nitrógeno entre 5.18 a 5.79 $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$, P de 0.45 a 0.66 $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$, K de 1.17 a 2.01 $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$, Ca de 7 a 27 $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$, y Mg de 6 a 18 $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$. Sólo las pérdidas de Mg se parecen a los obtenidos en San Juan Sur, que varían de 9 a 29 $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$.

Santana y Cabala-Rosand citados por Imbach (1987) en un sistema Cacao - Erythrina encontraron pérdidas de 67.8, 0.50, 2.0, 38.0 y 63 $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ de N, P, K, Ca y Mg respectivamente. Entre estos valores los que más se aproximan a los obtenidos en San Juan Sur son el N y P.

Espinoza y Dos Reis (1984) utilizando cápsulas porosas (lisimétricas) en latosoles del Cerrado en Brasil, en condiciones de irrigación para un total de 1920 mm, determinaron que el agua drenada hasta 105 cm de profundidad varió entre 637 y 1555 mm. A esta profundidad registraron pérdidas, de Ca entre 34.5 y 203 kg/ha con un promedio de 125.95 kg/ha , de Mg entre 16.2 y 73.2 kg/ha con promedio de 49.71 kg/ha , y de potasio entre 8.9 y 27.2 kg/ha .

Chabalier (1984) trabajando en suelos ferralíticos, compara dos métodos para medir la lixiviación de nutrientes: cápsulas lisimétricas y lisímetros. Los resultados de balance hídrico concordaron; por otro lado manifiesta que el nitrógeno y cloruros son los responsables del desplazamiento de calcio y magnesio. Saragoni et al (1990) trabajando en el mismo tipo de suelos, reportaron pérdidas de potasio hasta $10 \text{ kg*ha}^{-1}\text{año}^{-1}$; para el caso de nitrógeno y calcio estas pérdidas alcanzan hasta $100 \text{ kg*ha}^{-1}\text{año}^{-1}$.

Las investigaciones sobre procesos hidricos relacionados con la erosión de suelos en tierras de ladera han centrado su atención, básicamente, a las pérdidas de suelo y nutrientes por erosión hídrica y escorrentia, sin considerar la percolación del agua y los fenómenos asociados con ésta. Por esta razón no hay antecedentes para realizar comparaciones en estas condiciones. Sin embargo, se hace referencia al trabajo de Imbach (1987) quien utilizó los mismos lisímetros en condiciones de tierras planas.

Otro aspecto muy importante que se debe tener en cuenta para explicar los valores altos de Ca perdidos por lixiviación es que estos suelos han recibido un encalado de 2.6 t/ha en el primer año (1990), por lo que la concentración de Ca intercambiable es alto. Asimismo, una propiedad del alófono es la relativa fácil pérdida de bases intercambiables y la tendencia a desarrollar grados muy bajos de saturación de bases, incluso para el calcio (Okajima 1980).

La lixiviación de nutrientes del suelo resulta de la interacción entre dos fenómenos: la presencia de iones minerales disueltos en la solución del suelo, y el movimiento de dicha solución fuera del sistema. En el caso de los suelos estudiados, por su alta porosidad (Luzuriaga 1970 y Aguirre 1971, citados por Lebeuf 1993) y conductividad hidráulica

rápida (Silvestre et al 1993), cuando las lluvias penetran en el suelo, los elementos fácilmente solubles pasan de las capas superficiales del suelo a las más profundas; de esta manera el nitrógeno y calcio se lavan fácilmente (Gavande 1972).

La pérdida de nutrimentos causado por el fenómeno de lixiviación es de gran importancia para el agricultor porque se pueden traducir en menores rendimientos o costos elevados para conseguir un determinado nivel de producción. Además de estas consideraciones puramente económicas existe una preocupación con el efecto deteriorante del medio ambiente derivados del manejo ineficiente de los fertilizantes. Los nutrimentos lixiviados se incorporan al nivel freático por el proceso de drenaje interno, y así son transportados a grandes distancias, contaminando la capa freática y finalmente las fuentes de agua potable (Espinoza y Dos Reis 1984).

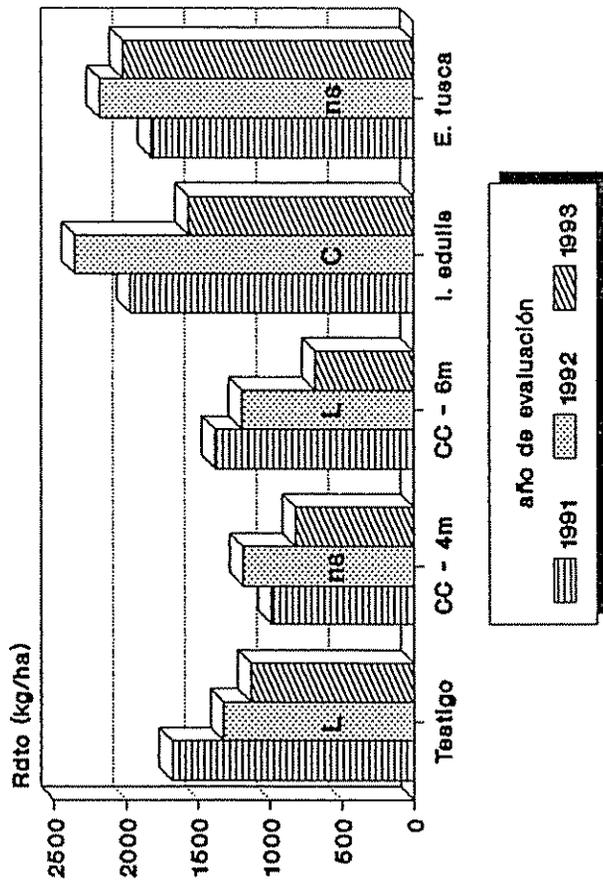
4.2 Rendimientos de los cultivos.

4.2.1 Rendimientos de frijol.

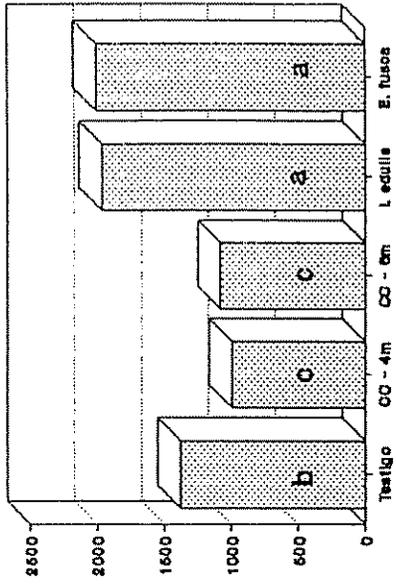
Los rendimientos de frijol varían desde 586 kg/ha obtenidos en el tercer año con el cultivo en callejones de seis metros ubicado en el bloque B (3^{er} a, CC-6m, bB), hasta 2586 kg/ha (2^{do} a, MInga, bA).

El análisis de varianza (cuadro 4.4, Fig 4.2) muestra la existencia de diferencias altamente significativas para bloques, tratamientos, y años, y diferencia significativa para la interacción tratamiento por año; esta última podría estar asociada además de los años, al efecto de las dosis de cobertura que se redujo año tras año. El análisis de efectos simples de años en tratamientos indica tendencia lineal para tradicional y CC-6m, tendencia cuadrática para MInga, y tendencia no definida en los tratamientos CC-4m y MErythrina.

EFFECTOS SIMPLES DE AÑOS EN TRATAMIENTOS



Prueba de Tukey: TRATAMIENTOS



Prueba de Tukey: AÑOS

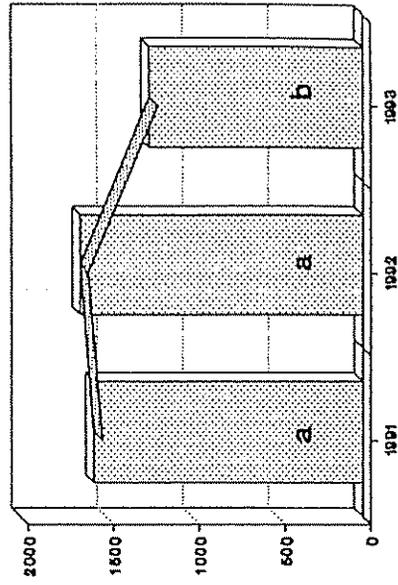


Fig 4.2 Rendimiento de frijol (kg/ha), San Juan Sur, Turrialba (1991 - 1993)

Cuadro 4.4 Análisis de varianza de los rendimientos de frijol en una rotación frijol-maíz. San Juan Sur (1991 - 1993).

Fuentes	GL	S. C.	C. M.	Fc	Pr > F
Bloque	2	1053206.04	526603.02	65.48	0.0001**
Trat	4	8216608.67	2054152.17	255.41	0.0001**
error (a)	8	64341.07	8042.63	0.18	0.9908
Año	2	1371852.31	685926.16	15.49	0.0001**
Trat*Año	8	1202295.47	150286.93	3.39	0.0126*
Testigo (L)	1	454300.17	454300.17	10.26	0.0045**
Testigo (C)	1	14280.50	14280.50	0.32	0.5764
CC-4m (L)	1	42504.17	42504.17	0.96	0.3389
CC-4m (C)	1	161880.50	161880.50	3.66	0.0703
CC-6m (L)	1	727320.17	727320.17	16.43	0.0006**
CC-6m (C)	1	53246.72	53246.72	1.20	0.2858
MInga (L)	1	244420.17	244420.17	5.52	0.0292*
MInga (C)	1	687182.72	687182.72	15.52	0.0008**
MErythrina(L)	1	57428.17	57428.17	1.30	0.2682
MErythrina(C)	1	131584.50	131584.50	2.97	0.1001
error (b)	20	885396.89	44269.84		
Total	44	12793700.44			

C.V. = 14.17 % Rend. promedio = 1484.89 kg/ha

* significativo (al 5 %)

** altamente significativo (al 1 %)

La reducción de rendimientos observados en estos tratamientos probablemente se deban a la disminución de la fertilidad natural del suelo, puesto que no recibieron ningún tipo de fertilización adicional después de cada cosecha, desde la implantación de la rotación en diciembre de 1990.

Cuando se analiza, mediante la prueba de Tukey ($\alpha = 0.05$), el rendimiento por años como promedio de todos los tratamientos (Fig 4.2), se observa que los rendimientos obtenidos en el primer año (1567 kg/ha) y segundo año (1646 kg/ha) son superiores a los obtenidos en el tercer año (1242 kg/ha). Por otro lado, el análisis de rendimiento por tratamientos (promedio de tres años), señala a las coberturas (MInga con 2007 kg/ha y MErythrina con 1963 kg/ha) como superiores a los demás tratamientos (Fig 4.2).

Los rendimientos superiores obtenidos en las coberturas pueden explicarse por los múltiples efectos que ofrecen éstos en beneficio del cultivo, como son: la contribución de nutrimentos a través de la descomposición (Bartholomew 1975); el control de malezas principalmente cuando la descomposición de la cobertura es lenta (Salazar 1990, citado por Contreras 1991); la regulación de la temperatura (Bartholomew 1975), evitando cambios bruscos que podrían afectar al sistema radicular y reduciendo la pérdida de calor del suelo; añadidura de humus, que facilita la entrada de aire creando un ambiente favorable para la actividad microbiana (Ayres 1960).

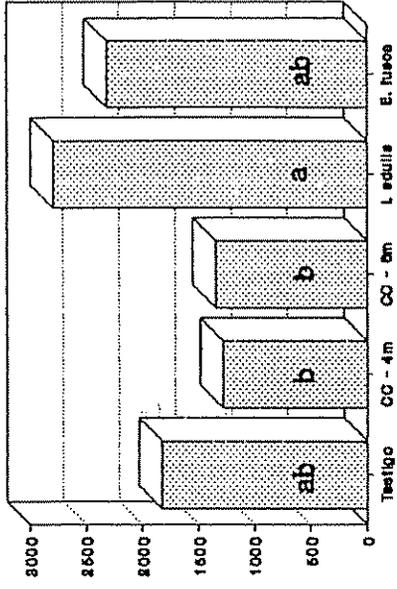
El aspecto relacionado a la regulación de la temperatura es muy importante en regiones tropicales donde se ha probado que el suelo desnudo, sometido a la acción directa del sol y del agua de lluvia, sufre graves daños en su productividad (Alonso et al 1979).

4.2.2 Rendimientos de maíz.

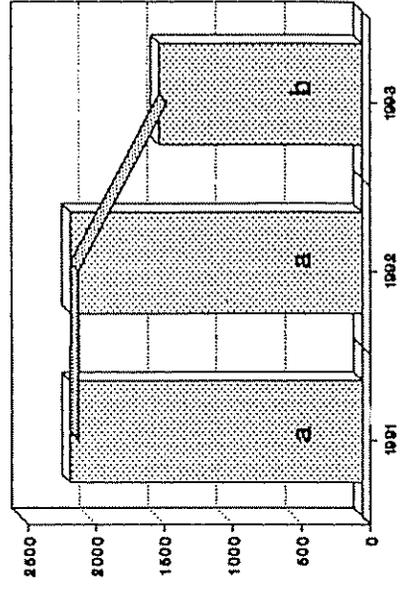
Los rendimientos obtenidos en el cultivo de maíz varían desde 180 kg/ha obtenido en el tercer año con el cultivo en callejones de cuatro metros ubicado en el bloque A (3^{er} a, CC-4m, bA), hasta 4184 kg/ha (2^{do} a, MErythrina, bC).

El análisis de varianza (cuadro 4.5) muestra la existencia de diferencia altamente significativa para tratamientos y diferencia significativa para bloques y años; no se encontró diferencia en la interacción tratamiento por año. El análisis de efectos simples indica que no existe una tendencia definida para los rendimientos de maíz a través del tiempo (Fig 4.3); Sin embargo, se puede observar que estos disminuyen a medida que pasan los años.

Prueba de Tukey: TRATAMIENTOS



Prueba de Tukey: AÑOS



EFFECTOS SIMPLES DE AÑOS EN TRATAMIENTOS

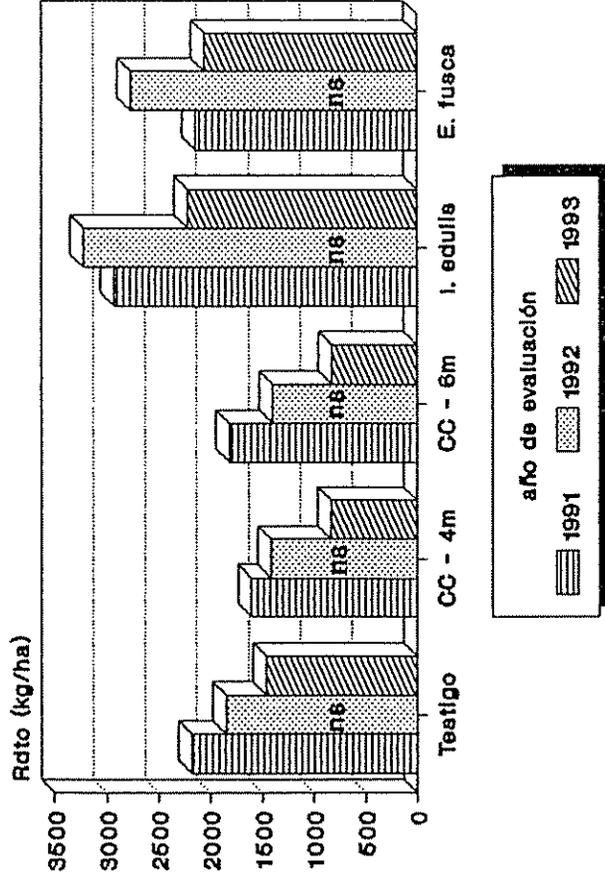


Fig 4.3. Rendimientos de maíz (kg/ha), San Juan Sur, Turrialba (1991 - 1993)

Cuadro 4.5 Análisis de varianza de los rendimientos de maiz en una rotación frijol-maíz. San Juan Sur (1991 - 1993).

Fuentes	GL	S. C.	C. M.	Fc	Pr > F
Bloque	2	6320819.73	3160409.87	6.92	0.0180*
Trat	4	14886289.87	3721572.47	8.15	0.0064**
error (a)	8	3653600.27	456700.03	1.20	0.3485
Año	2	4288960.93	2144480.47	5.63	0.0115*
Trat*Año	8	1481980.40	185247.55	0.49	0.8517ns
error (b)	20	7620600.00	381030.00		
Total	44	38252251.20			

C.V. = 32.30 % Rend. promedio = 1911.20 kg/ha

* significativo (al 5 %)

** altamente significativo (al 1 %)

El análisis, utilizando la prueba de Tukey ($\alpha = 0.05$), del rendimiento, por tratamientos como promedio de años, indica que el obtenido con MInga (2787 kg/ha) es superior a los obtenidos con los cultivos en callejones (CC-6m con 1345 kg/ha y CC-4m con 1283 kg/ha). Así mismo, cuando se analiza por años, como promedio de tratamientos, se observa que los rendimientos obtenidos en el primer año (2130 kg/ha) y segundo año (2129 kg/ha) son superiores al obtenido en el tercer año (1475 kg/ha).

Para la comparación entre tratamientos, Lebeuf (1993) encontró resultados similares y atribuye los bajos rendimientos en cultivos en callejones a la escasa biomasa aportada por el componente arbóreo del sistema. Este problema de producción de biomasa fue evidente por lo que se decidió fertilizar con sulfato de magnesio, el mismo que ayudó en la recuperación de los árboles.

Los bajos rendimientos obtenidos en los cultivos en callejones puede deberse a la menor densidad que estas alcanzan luego de que una parte del terreno ha sido ocupado

por los árboles. Por otra parte, Kass et al (1989) manifiestan que hay una aparente competencia entre árboles y cultivos que pueden resultar en una limitante del sistema.

Debe destacarse el hecho de que en el bloque C, durante el tercer año, el mayor rendimiento se obtuvo en el cultivo en callejón de cuatro metros (1889 kg/ha), a pesar de los problemas antes mencionados. Sin embargo, el promedio para este tratamiento se reduce drásticamente porque en el bloque A el rendimiento resultó ser apenas 180 kg/ha (el más bajo de todo el experimento, en los tres años).

Esta variación en los rendimientos, para el mismo tratamiento, se atribuye a que en el bloque B los árboles de este tratamiento produjeron una biomasa superior a las 8 t/ha que fue lo que se aplicó en los cultivos con cobertura. Por el contrario en el bloque A, la producción de biomasa fue escasa.

4.3 Extracción de nutrimentos del suelo, por los cultivos.

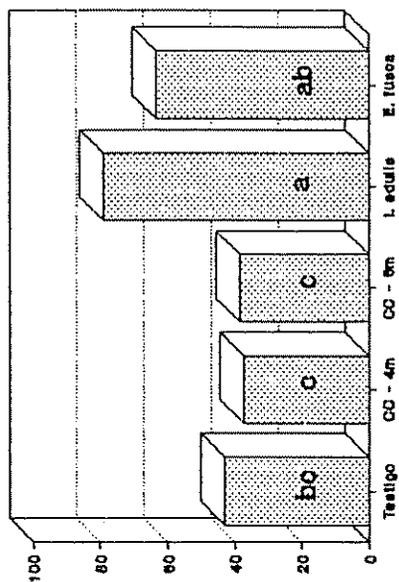
4.3.1 Extracción de nutrimentos por el frijol.

Nitrógeno.

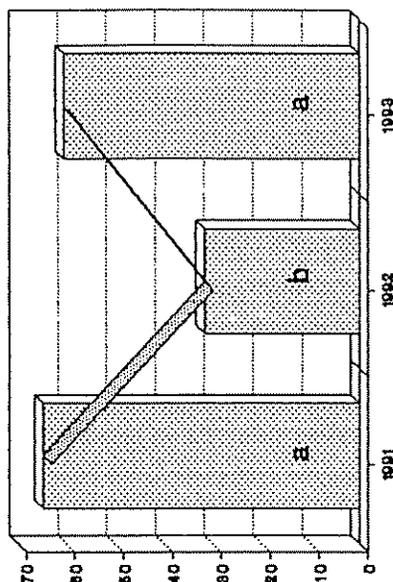
La extracción de N por el frijol varía desde 14.49 kg/ha obtenido en el segundo año con el tratamiento Tradicional ubicado en el bloque A (2^{do} a, Tradicional, bA), hasta 113.20 kg/ha (3^{er} a, MErythrina, bB).

El análisis de varianza (cuadro 4.6) indica la existencia de diferencia altamente significativa para tratamientos, años e interacción tratamiento por año. El análisis de efectos simples indica una tendencia cuadrática para la extracción de N a través del tiempo en todos los tratamientos (Fig 4.4); sin embargo, estos resultados no guardan relación con la

Prueba de Tukey: TRATAMIENTOS



Prueba de Tukey: AÑOS



EFFECTOS SIMPLES DE AÑOS EN TRATAMIENTOS

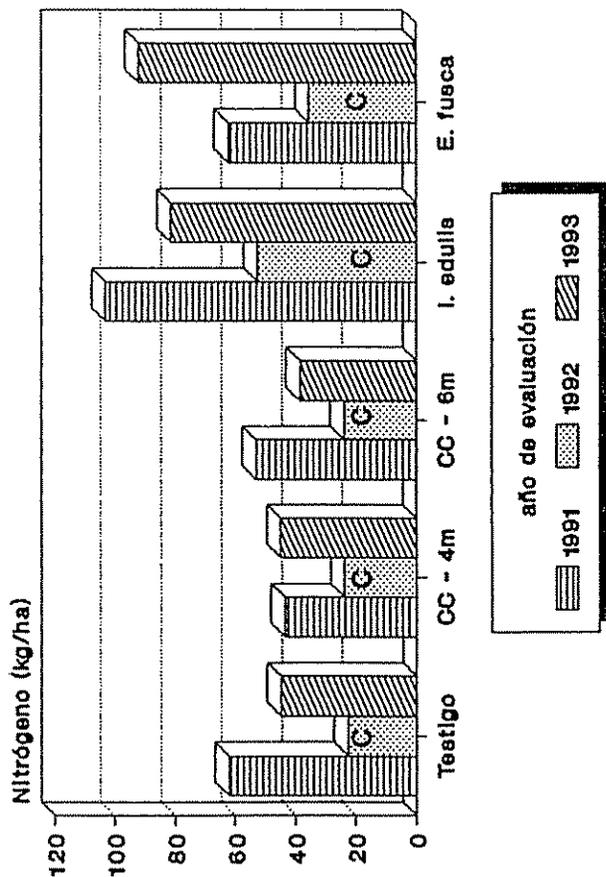


Fig 4.4 Extracción de N (kg/ha) por el frijol, San Juan Sur, Turrialba (1991 - 1993)

tendencia de rendimientos, ya que la concentración de nutrimentos en la biomasa fue similar. Esto probablemente se deba a un error de muestreo en el segundo año; por esta razón se realizó una corrección a estos valores utilizando un factor de ajuste que resultó de una regresión hecha con los datos del último año.

Cuadro 4.6 Análisis de varianza de la extracción de nitrógeno por el frijol en una rotación frijol-maíz. San Juan Sur (1991 - 1993).

Fuentes	GL	S. C.	C. M.	Fc	Pr > F
Bloque	2	747.08	373.54	1.67	0.2471
Trat	4	11976.11	2994.03	13.41	0.0013**
error (a)	8	1785.53	223.19	2.11	0.0842
Año	2	9728.53	4864.27	45.96	0.0001**
Trat*Año	8	3392.73	424.09	4.01	0.0056**
Testigo (L)	1	442.04	442.04	4.18	0.0544
Testigo (C)	1	1915.81	1915.81	18.10	0.0004**
CC-4m (L)	1	2.91	42504.17	0.96	0.8699
CC-4m (C)	1	843.78	161880.50	3.66	0.0105*
CC-6m (L)	1	320.32	727320.17	16.43	0.0973
CC-6m (C)	1	975.05	53246.72	1.20	0.0065**
MInga (L)	1	705.25	244420.17	5.52	0.0178*
MInga (C)	1	3142.92	687182.72	15.52	0.0001**
MErythrina(L)	1	1323.14	57428.17	1.30	0.0021**
MErythrina(C)	1	3450.04	131584.50	2.97	0.0001**
error (b)	20	2116.71	105.84		
Total	44	29746.68			

C.V. = 19.68 % Extr. promedio = 52.286 kg/ha

* significativo (al 5 %)

** altamente significativo (al 1 %)

La extracción de N por el frijol (considerando los datos corregidos) varía desde 27.14 kg/ha (3^{er} a, CC-4m, bB) hasta 113.20 kg/ha (3^{er} a, MErythrina, bB).

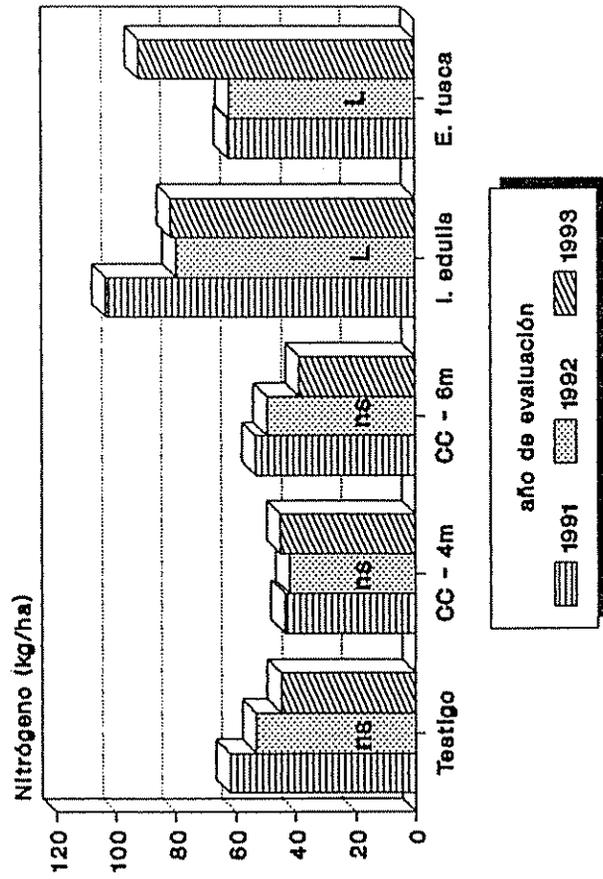
El análisis de varianza, incluyendo los datos corregidos (cuadro 1a, Fig 4.5), muestra la existencia de diferencia significativa para la interacción tratamiento por año y diferencia altamente significativa para tratamientos. No hay diferencia entre bloques, ni entre años. El estudio de efectos simples indica que existe tendencia lineal en las coberturas (MInga, MErythrina) mientras que para los cultivos en callejones (CC-4m, CC-6m) y Tradicional no hay una tendencia definida.

El análisis, mediante la prueba de Tukey ($\alpha = 0.05$), de la extracción de N por tratamientos como promedio de años, indica que la extracción en la cobertura de Inga (88.01 kg/ha) fue superior a las extracciones por Tradicional (53.40 kg/ha) y por los cultivos en callejones (CC-4m, 43.52 kg/ha y CC-6m, 47.07 kg/ha).

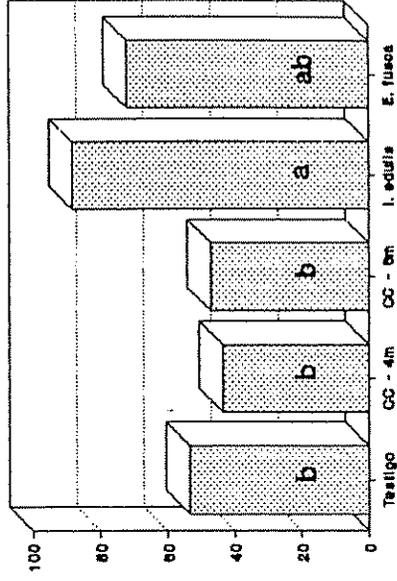
La no existencia de diferencia para la extracción de N, se podría explicar por existir una especie de compensación de valores, donde los cultivos en cobertura y el CC-4m mantienen o mejoran el nivel de extracción de este nutrimento principalmente en la parte residual del cultivo, es decir en el conjunto hojas, raíces y tallos. Los rendimientos en los tratamientos CC-4m y MErythrina se mantuvieron casi constantes a través de los tres años. Sin embargo, en el tercer año al igual que MInga produjeron más biomasa en el resto de la planta que en el mismo grano.

Por otra parte, el frijol debido a su capacidad de proveerse por si misma de N, por procesos de simbiosis, puede producir cosechas medias incluso sin abonado mineral (Finck 1985). Sin embargo, un suministro unilateral de este nutrimento puede provocar su acumulación en las partes vegetativas de la planta (Finck 1955) lo que se traduce en problemas como menor floración y retraso de la maduración (Sánchez y Martín 1980).

EFFECTOS SIMPLES DE AÑOS EN TRATAMIENTOS



Prueba de Tukey: TRATAMIENTOS



Prueba de Tukey: AÑOS

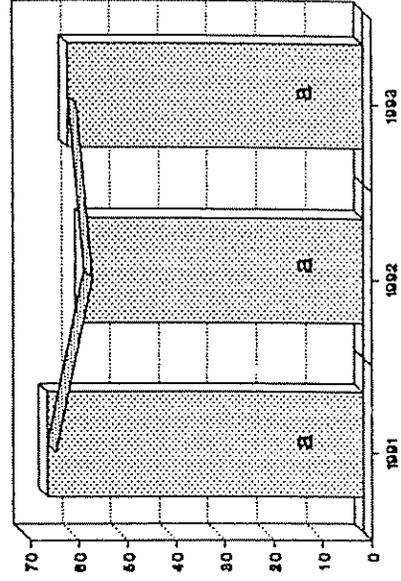


Fig 4.6 Extracción de N (kg/ha) por el frijol, San Juan Sur, Turrialba (1991 - 1993)

Fósforo.

La extracción de P por el cultivo de frijol varía desde 1.33 kg/ha obtenido en el segundo año en el cultivo en callejones de cuatro metros ubicado en el bloque B (2^{do} a, CC-4m, bA), hasta 11.76 kg/ha (1^{er} a, MInga, bA).

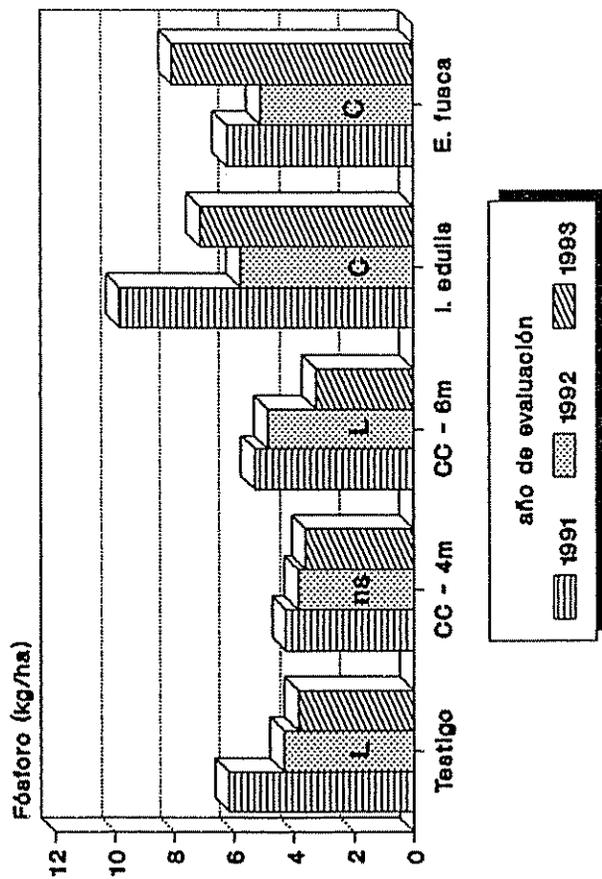
Al igual que para la extracción de N, se corrigieron los resultados del segundo año. De esta forma la extracción de P por el frijol varía desde 2.19 kg/ha (3^{er} a, CC-4m, bB) hasta 11.76 kg/ha (1^{er} a, MInga, bA).

El análisis de varianza (Cuadro 2a, Fig 4.6), muestra diferencias altamente significativas para tratamientos y años y diferencia significativa para la interacción tratamiento por año. Del estudio de efectos simples se desprende que existe tendencia lineal, para el ritmo de extracción de P a través del tiempo, en el Testigo y CC-6m, tendencia cuadrática en las coberturas (MInga, MErythrina); No se encontró alguna tendencia definida en CC-4m.

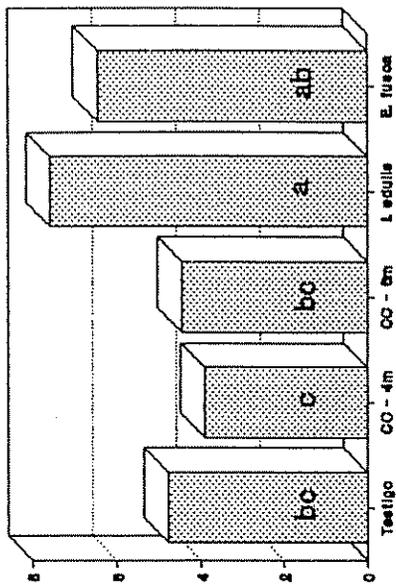
El análisis, mediante la prueba de Tukey ($\alpha = 0.05$), de la extracción de P por tratamientos como promedio de tres años, indica que la extracción por el tratamiento MInga (7.57 kg/ha) es superior a las extracciones de P por el Testigo (4.78 kg/ha) y por los cultivos en callejones (4.46 kg/ha en CC-6m, 3.90 kg/ha en CC-4m). Las extracciones anuales de P por el frijol, como promedio de los tratamientos, en el primer año (6.35 kg/ha) fue superior a las extracciones ocurridas en el tercer año (5.17 kg/ha) y segundo año (4.78 kg/ha).

En cuanto a este nutrimento, la disminución de la extracción a través del tiempo podría deberse a la misma disponibilidad (escasa) de éste en el suelo. La mayor extracción ocurrió en el primer año; asimismo, su escasa o ninguna restitución, no satisface la demanda del cultivo.

EFFECTOS SIMPLES DE AÑOS EN TRATAMIENTOS



Prueba de Tukey: TRATAMIENTOS



Prueba de Tukey: AÑOS

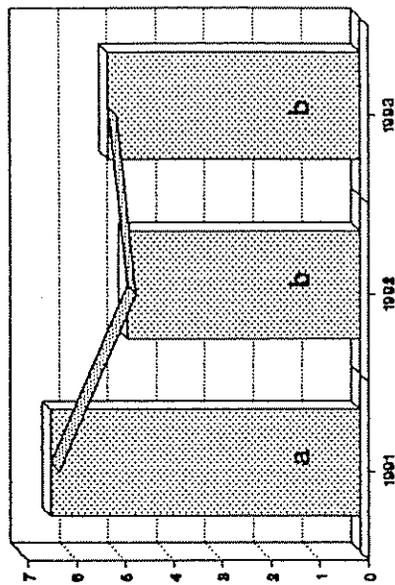


Fig 4.6 Extracción de P (kg/ha) por el frijol, San Juan Sur, Turrialba (1991 - 1993)

Potasio.

La extracción de K por el cultivo de frijol varía desde 11.86 kg/ha obtenido en el segundo año en el Testigo ubicado en el bloque B (2^{do} a, Testigo, bB), hasta 134.43 kg/ha (1^{er} a, MInga, bB).

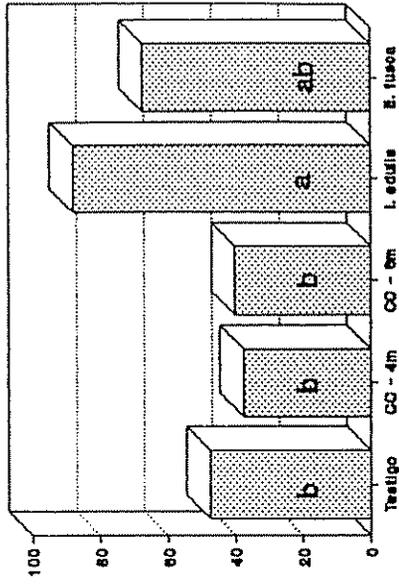
Por las mismas razones expuestas para la extracción de N, se realizó la corrección de los resultados de extracción de K en el segundo año. La extracción de K, con los datos así corregidos, varía desde 15.94 kg/ha (3^{er} a, CC-4m, bB) hasta 134.43 kg/ha (1^{er} a, MInga, bB).

El análisis de varianza (cuadro 3a, Fig 4.7), muestra diferencias altamente significativas para tratamientos y años y diferencia significativa para la interacción tratamiento por año. El estudio de efectos simples indica que existe tendencia lineal, para el ritmo de extracción de P a través del tiempo, en el Testigo, CC-6m y MInga; no se encontró una tendencia definida en CC-4m y MErythrina.

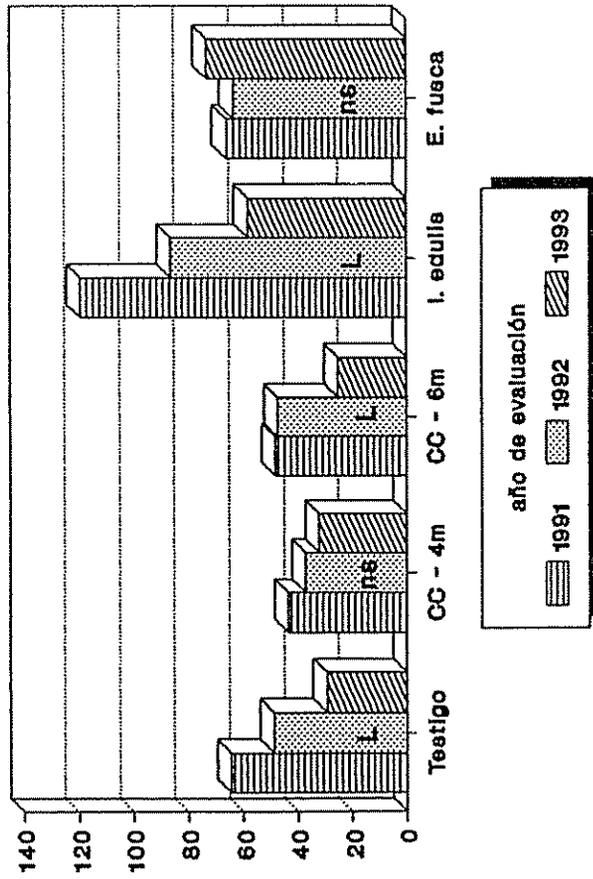
El análisis, mediante la prueba de Tukey ($\alpha = 0.05$), de la extracción de P por tratamientos (promedio de tres años), indica que la extracción por el tratamiento MInga (87.9 kg/ha) es superior a las extracciones de P por el Testigo (47.5 kg/ha) y por los cultivos en callejones (40.1 kg/ha en CC-6m, 37.6 kg/ha en CC-4m). Las extracciones anuales de K, como promedio de los tratamientos, en el primer año (68.2 kg/ha) y segundo año (56.6 kg/ha) fueron superiores a la extracción de K obtenida en el tercer año (43.6 kg/ha).

A excepción de los tratamientos CC-4m y MErythrina en el resto de los tratamientos la extracción de potasio se reduce a través del tiempo (años) en forma significativa. Esto puede deberse al agotamiento progresivo en la reserva de éste en el suelo.

Prueba de Tukey: TRATAMIENTOS



EFFECTOS SIMPLES DE AÑOS EN TRATAMIENTOS



Prueba de Tukey: AÑOS

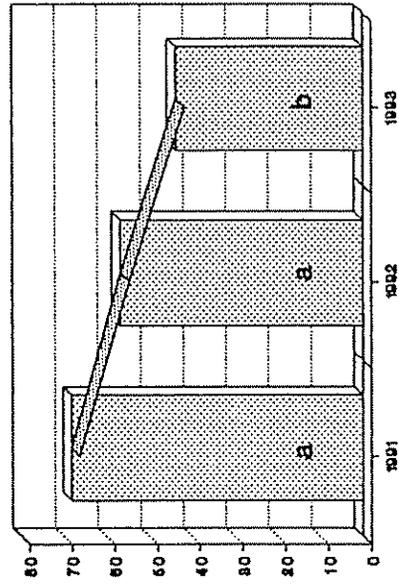


Fig 4.7 Extracción de K (kg/ha) por el frijol, San Juan Sur, Turrialba (1991 - 1993)

Calcio.

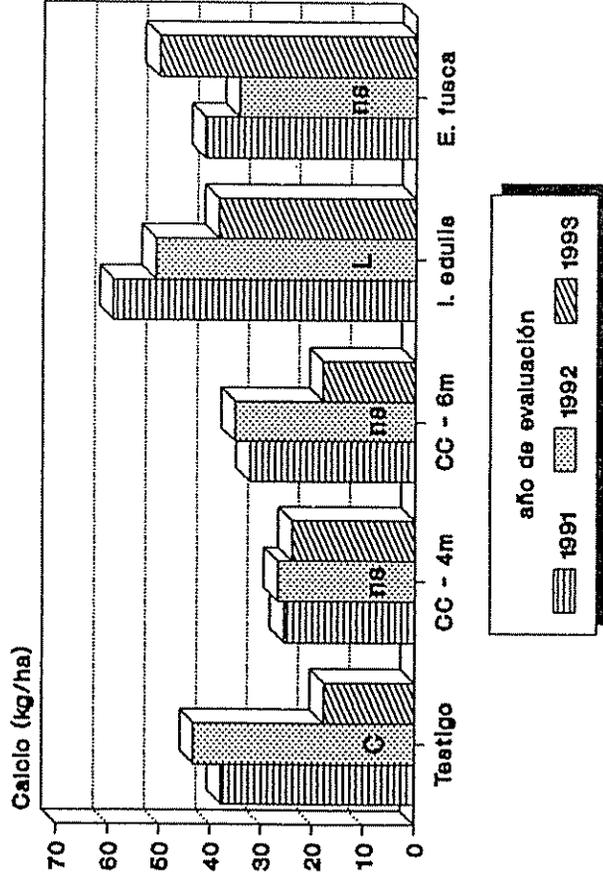
La extracción de Ca por el cultivo de frijol varía desde 6.54 kg/ha obtenido en el segundo año con el Testigo ubicado en el bloque A (2^{do} a, Testigo, bA), hasta 72.87 kg/ha (1^{er} a, MInga, bA). Como en el caso de la extracción de N, se realizó la corrección de los resultados de extracción de nutrientes del segundo año. Así, la extracción de Ca varía desde 8.85 kg/ha (3^{er} a, Testigo, bA) hasta 72.87 kg/ha (1^{er} a, MInga, bA).

El análisis de varianza, incluyendo los datos corregidos (cuadro 4a, Fig 4.8), muestra diferencias significativas para tratamientos, años e interacción tratamiento por año. Del estudio de efectos simples se desprende que existe tendencia lineal, para el ritmo de extracción de P a través del tiempo, en el CC-6m y MInga, tendencia cuadrática en el Testigo; no se encontró una tendencia definida en CC-4m.

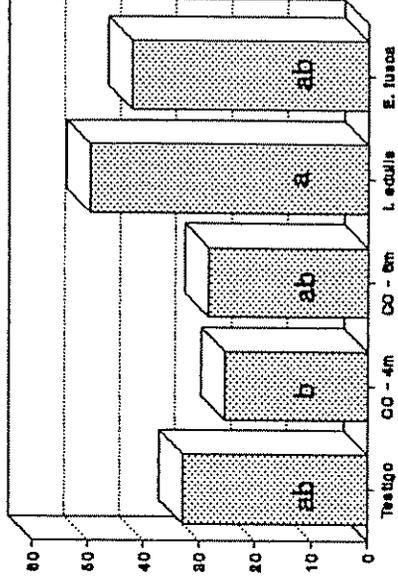
El análisis, mediante la prueba de Tukey ($\alpha = 0.05$), de la extracción de Ca por tratamientos como promedio de tres años, indica que la extracción por el tratamiento MInga (49.6 kg/ha) es superior a las extracciones de Ca por el CC-4m (25.4 kg/ha). Las extracciones anuales de Ca, como promedio de los tratamientos, en el primer año (39.2 kg/ha) y segundo año (38.2 kg/ha) fueron superiores a la extracción ocurrida en el tercer año (29.7 kg/ha).

La extracción del calcio en los dos primeros años, superiores al tercer año, se puede explicar por la disponibilidad de cal provenientes del encalado, el mismo que podría estar disminuyendo por diversos procesos. La tendencia a la disminución en la parcela con MInga se debe a la pobreza en calcio de este material. Por el contrario la *E. fusca* es rica en calcio, por lo que la extracción de calcio en este tratamiento se mantiene en su nivel.

EFFECTOS SIMPLES DE AÑOS EN TRATAMIENTOS



Prueba de Tukey: TRATAMIENTOS



Pruebas de Tukey: AÑOS

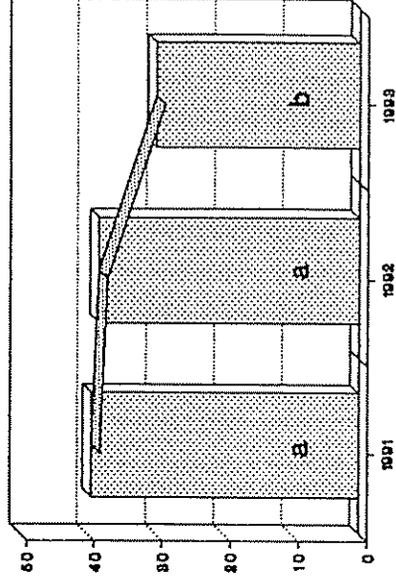


Fig 4.8 Extracción de Ca (kg/ha) por el frijol, San Juan Sur, Turrialba (1991 - 1993)

Magnesio.

La extracción de Mg por el cultivo de frijol varía desde 1.09 kg/ha obtenido en el segundo año con el Cultivo en callejones de seis metros ubicado en el bloque B (2^{do} a, CC-6m, bB), hasta 16.12 kg/ha (1^{er} a, MInga, bA).

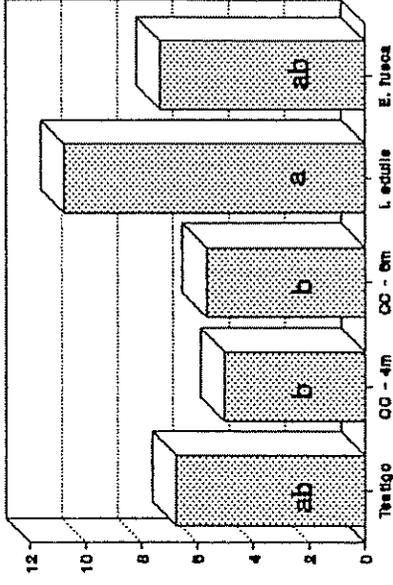
Por las mismas razones expuestas para la extracción de N, se realizó la corrección de los resultados de extracción de Mg en el segundo año. La extracción de Mg, con los datos así corregidos, varía desde 1.67 kg/ha (3^{er} a, CC-6m, bB) hasta 16.12 kg/ha (1^{er} a, MInga, bA).

El análisis de varianza (cuadro 5a, Fig 4.9), muestra diferencias altamente significativas para año y diferencia significativa para tratamientos; no se encontró diferencia significativa para la interacción tratamiento por año. El estudio de efectos simples indica que existe tendencia lineal, para el ritmo de extracción de Mg a través del tiempo, en el Testigo, CC-6m y MInga; no se encontró una tendencia definida en CC-4m y MErythrina.

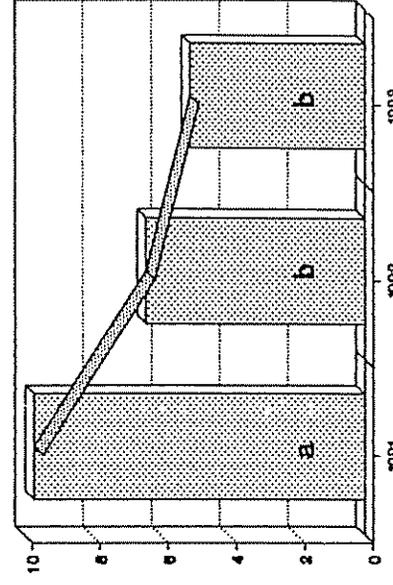
El análisis, mediante la prueba de Tukey ($\alpha = 0.05$), de la extracción de Mg por tratamientos (promedio de tres años), indica que la extracción por el tratamiento MInga (10.76 kg/ha) es superior a las extracciones de Mg por los cultivos en callejones (5.66 kg/ha en CC-6m, 5.01 kg/ha en CC-4m). La extracción de Mg por años como promedio de los tratamientos, obtenida en el primer año (9.72 kg/ha) es superior a las extracciones obtenidas en el segundo año (6.44 kg/ha) y tercer año (5.14 kg/ha).

Las tendencias de la extracción de este nutrimento son algo similares al del calcio. Aunque al analizar por años, la extracción disminuye significativamente a partir del segundo año, que en el caso del calcio sucedió en el tercer año.

Prueba de Tukey: TRATAMIENTOS



Prueba de Tukey: AÑOS



EFFECTOS SIMPLES DE AÑOS EN TRATAMIENTOS

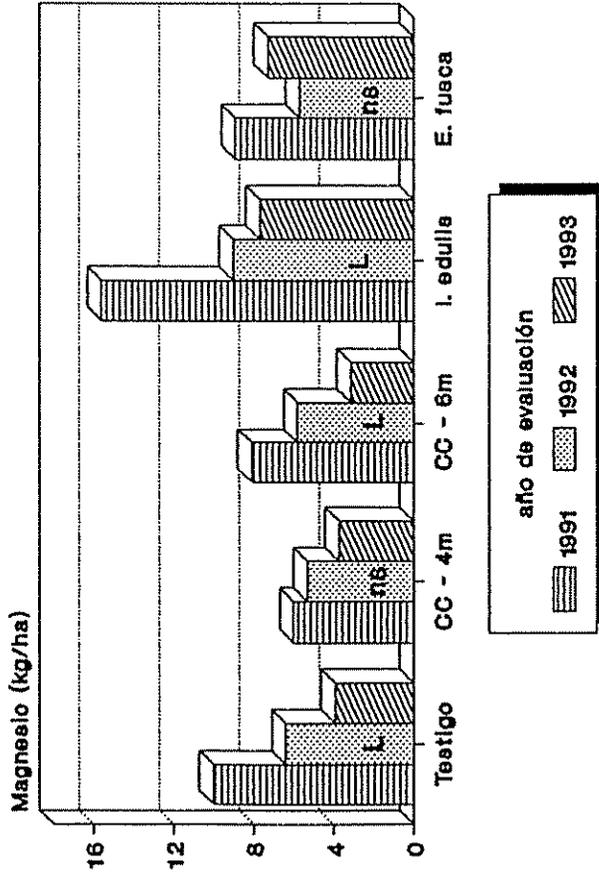


Fig 4.9 Extracción de Mg (kg/ha) por frijol, San Juan Sur, Turrialba (1991 - 1993)

4.3.2 Extracción de nutrimentos por el maíz.

Nitrógeno.

Las cantidades de N extraídos por el cultivo de maíz varían desde 12.52 kg/ha obtenido en el tercer año con el cultivo en callejones de 4 m ubicado en el bloque A (3^{er} a, CC-4m, bA), hasta 123.42 kg/ha (1^{er} a, Mínga, bC).

El análisis de varianza, (cuadro 1a, Fig 4.10), muestra diferencias altamente significativas entre bloques, tratamientos y años. No hay diferencia significativa en la interacción tratamiento por año.

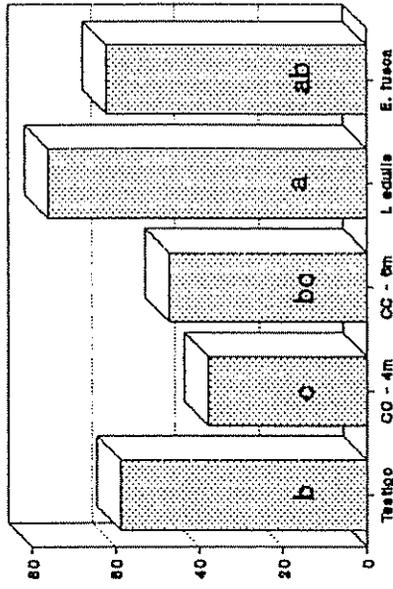
El estudio de efectos simples indica que existe tendencia lineal en el Testigo y CC-6m, tendencia cuadrática en Mínga; Sin embargo, para CC-4m y MErythrina no hay tendencia definida.

El análisis, mediante la prueba de Tukey ($\alpha = 0.05$), de la extracción de N por tratamientos como promedio de años, indica que la extracción por el tratamiento Mínga (75.95 kg/ha) fue superior a las extracciones por el Testigo (58.81 kg/ha) y por los cultivos en callejones (47.25 kg/ha en CC-6m y 37.78 kg/ha en CC-4m). La extracción de N, por años como promedio de los tratamientos, obtenida en el primer año (75.66 kg/ha) fue superior a las extracciones obtenidas en el segundo año (50.66 kg/ha) y tercer año (42.78 kg/ha).

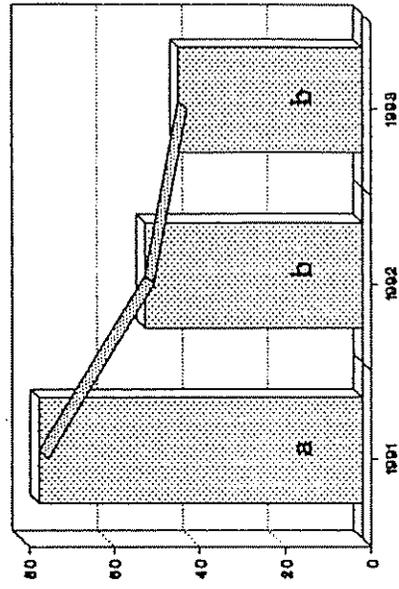
Fósforo.

La extracción de P por el maíz, varía desde 1.97 kg/ha obtenida en el tercer año con el cultivo en callejones ubicado en el bloque B (3^{er} a, CC-4m, bB), hasta 21.33 kg/ha (1^{er} a, MErythrina, bC).

Prueba de Tukey: TRATAMIENTOS



Prueba de Tukey: AÑOS



EFFECTOS SIMPLES DE AÑOS EN TRATAMIENTOS

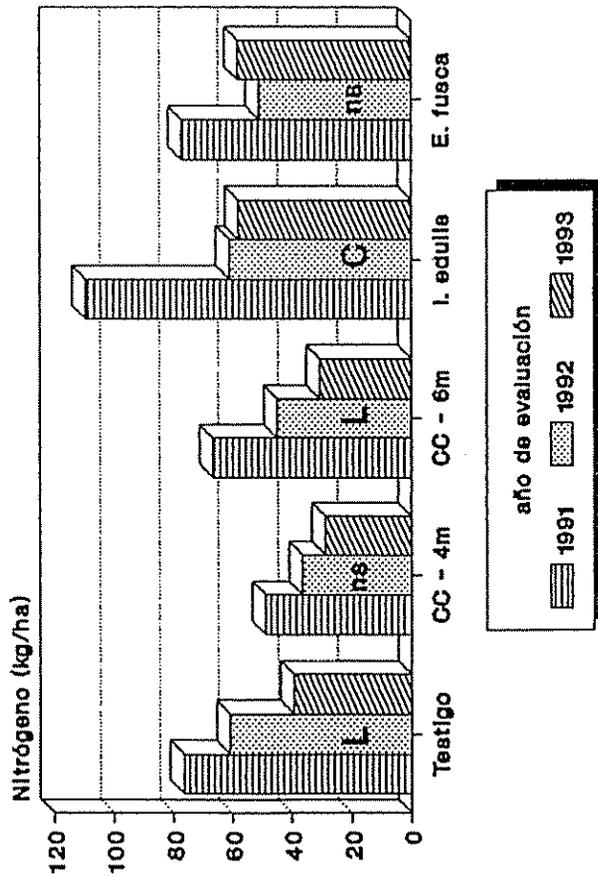


Fig 4.10 Extracción de N (kg/ha) por el maíz, San Juan Sur, Turrialba (1991 - 1993)

El análisis de varianza (cuadro 2a, Fig 4.11), muestra diferencias altamente significativas para tratamientos y años. No se encontró diferencia significativa para la interacción tratamiento por año. Del estudio de efectos simples se desprende que existe tendencia lineal, para el ritmo de extracción de P a través del tiempo, en el Testigo y CC-6m, tendencia cuadrática en las coberturas (MInga, MErythrina); no se encontró una tendencia definida en CC-4m.

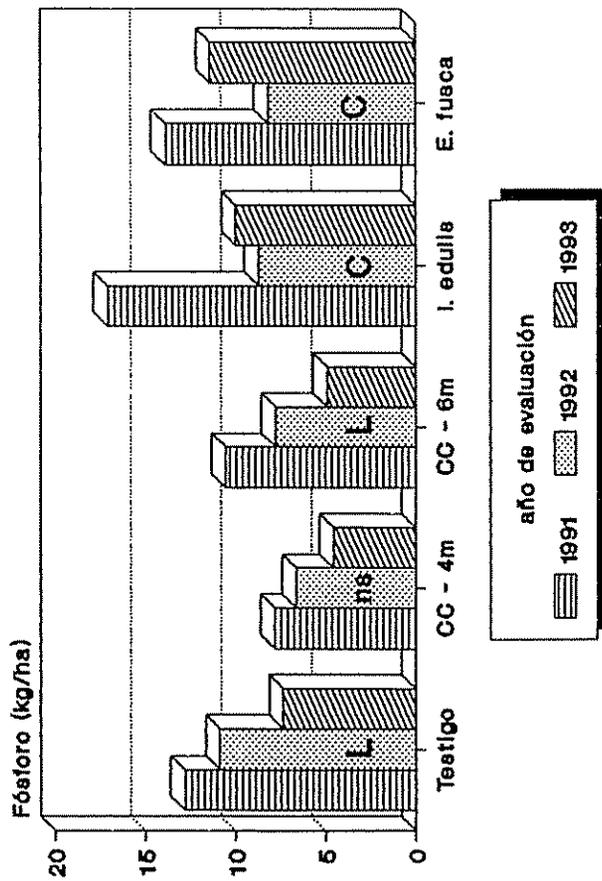
El análisis, mediante la prueba de Tukey ($\alpha = 0.05$), de la extracción de P por tratamientos (promedio de tres años), indica que la extracción por el tratamiento MInga (11.93 kg/ha) es superior a las extracciones de P por los cultivos en callejones (7.75 kg/ha en CC-6m, 6.35 kg/ha en CC-4m). Las extracciones de P, analizadas por años como promedio de los tratamientos, indican que en el primer año (12.44 kg/ha) se dieron extracciones superiores a las ocurridas en el segundo año (8.45 kg/ha) y tercer año (7.64 kg/ha).

Potasio.

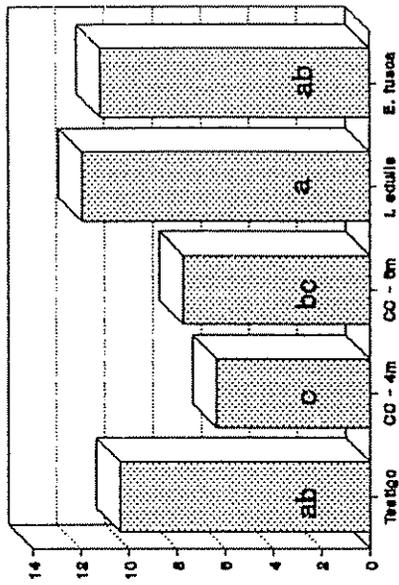
La extracción de K, varía desde 9.71 kg/ha obtenida en el tercer año con el cultivo en callejones de cuatro metros ubicado en el bloque B (3^{er} a, CC-4m, bB) hasta 138.51 kg/ha (1^{er} a, MInga, bC).

El análisis de varianza (cuadro 3a, Fig 4.12), muestra diferencias altamente significativas para tratamientos y año y diferencia significativa para la interacción tratamiento por año. El estudio de efectos simples indica que existe tendencia lineal para el ritmo de extracción de K a través del tiempo, en Testigo y CC-6m, tendencia cuadrática para las coberturas (MInga, MErythrina); no se encontró una tendencia definida en CC-4m.

EFFECTOS SIMPLES DE AÑOS EN TRATAMIENTOS



Prueba de Tukey: TRATAMIENTOS



Prueba de Tukey: AÑO

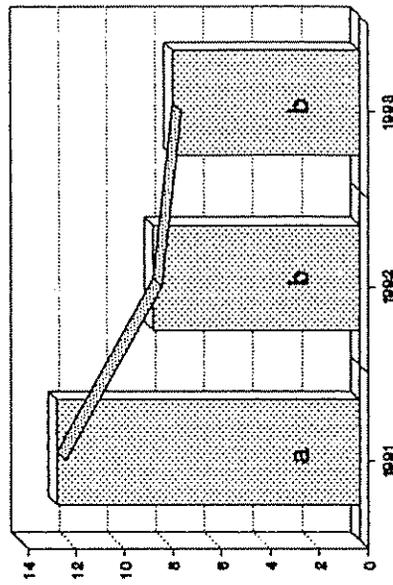
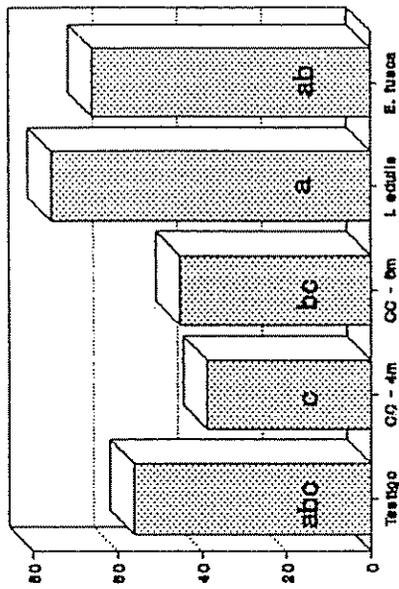
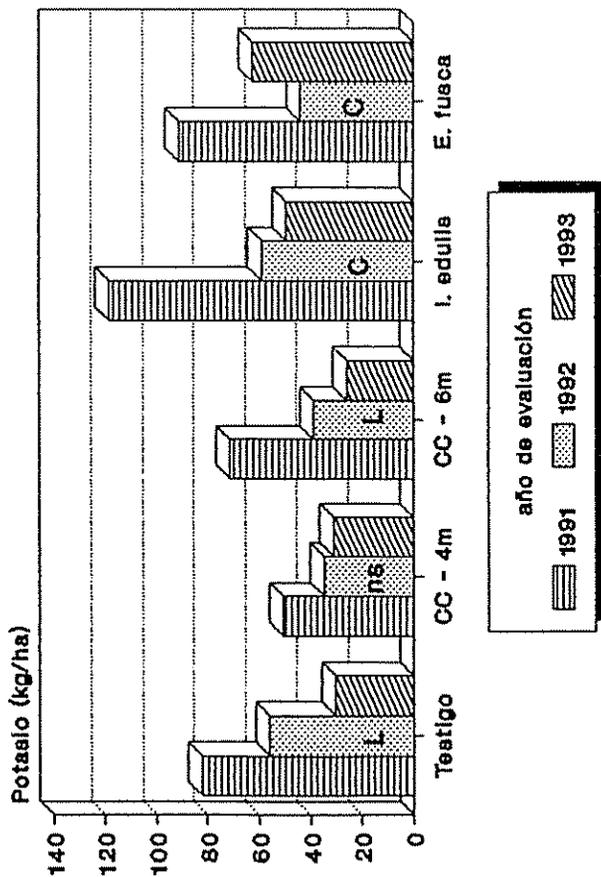


Fig 4.11 Extracción de P (kg/ha) por el maíz, San Juan Sur, Turrialba (1991 - 1993)

Prueba de Tukey: TRATAMIENTOS



EFFECTOS SIMPLES DE AÑOS EN TRATAMIENTOS



Prueba de Tukey: AÑOS

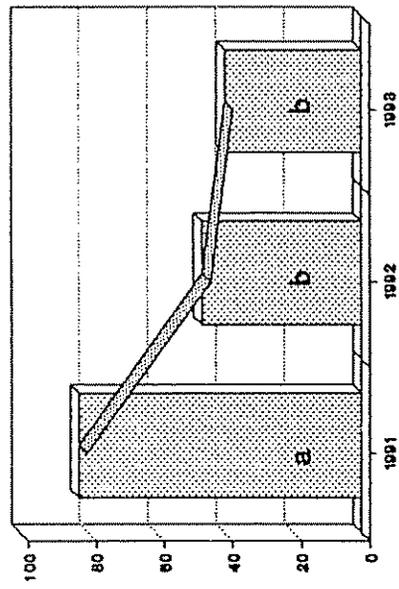


Fig 4.12 Extracción de K (kg/ha) por el maíz, San Juan Sur, Turrialba (1991 - 1993)

El análisis, mediante la prueba de Tukey ($\alpha = 0.05$), de la extracción de K por tratamientos como promedio de tres años, indica que la extracción por el tratamiento Mínga (75.53 kg/ha) es superior a las extracciones de K por los cultivos en callejones (45.2 kg/ha en CC-6m, 38.8 kg/ha en CC-4m). Al analizar por años, como promedio de los tratamientos, la extracción de K por el maíz en el primer año (82.6 kg/ha) fue superior a las obtenidas en el segundo año (46.4 kg/ha) y tercer año (39.8 kg/ha).

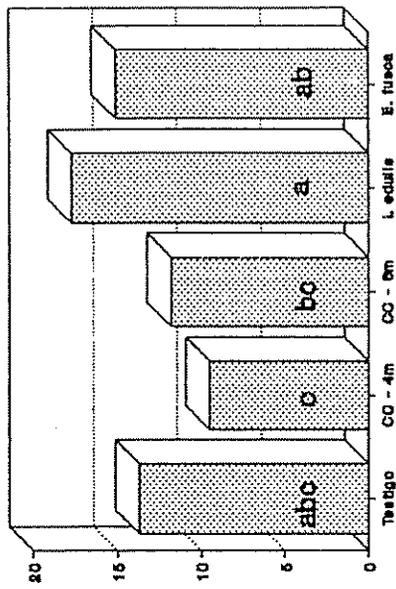
Calcio.

La extracción de Ca por el cultivo de maíz varía desde 4.11 kg/ha obtenido en el tercer año con el cultivo en callejones de cuatro metros ubicado en el bloque B (3^{er} a, CC-4m, bB) hasta 26.64 kg/ha (1^{er} a, Mínga, bC).

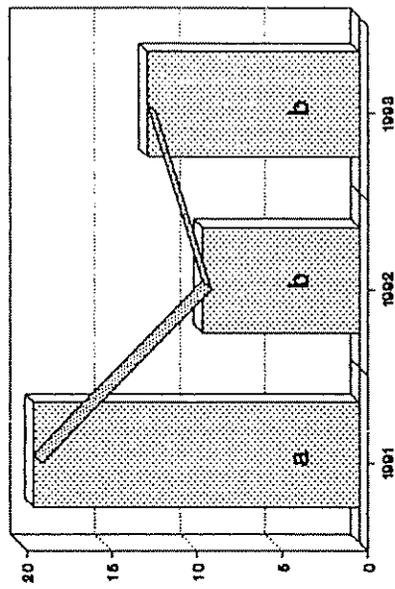
El análisis de varianza (cuadro 4a, Fig 4.13), muestra diferencias altamente significativas para tratamientos y años; no existe diferencia significativa para la interacción tratamiento por año. Del estudio de efectos simples se desprende que existe tendencia lineal, para el ritmo de extracción de P a través del tiempo, en el CC-6m, tendencia cuadrática en el Testigo y en los tratamientos con coberturas (Mínga, MErythrina); no se encontró una tendencia definida en CC-4m.

El análisis, mediante la prueba de Tukey ($\alpha = 0.05$), de la extracción de Ca por tratamientos como promedio de tres años, indica que la extracción por el tratamiento Mínga (17.66 kg/ha) es superior a las extracciones de Ca por el CC-6m (11.8 kg/ha) y CC-4m (9.5 kg/ha). Las extracciones anuales de Ca, como promedio de los tratamientos, en el primer año (19.1 kg/ha) fue superior a las extracciones ocurridas en el tercer año (12.4 kg/ha) y segundo año (9.5 kg/ha).

Prueba de Tukey: TRATAMIENTOS



Prueba de Tukey: AÑOS



EFFECTOS SIMPLES DE AÑOS EN TRATAMIENTOS

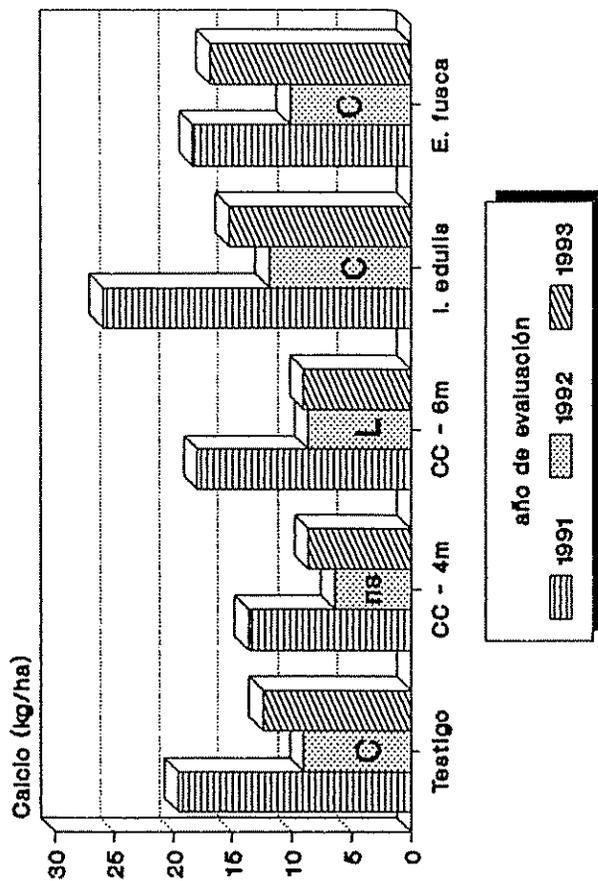


Fig 4.13 Extracción de Ca (kg/ha) por el maíz, San Juan Sur, Turrialba (1991 - 1993)

Magnesio.

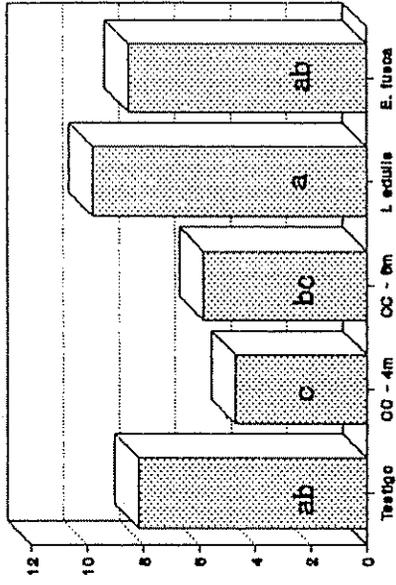
La extracción de Mg por el maíz varía desde 1.33 kg/ha obtenido en el tercer año en el cultivo en callejones de cuatro metros ubicado en el bloque B (3^{er} a, CC-4m, bB), hasta 20.82 kg/ha (1^{er} a, MInga, bC).

El análisis de varianza, incluyendo los datos corregidos (cuadro 5a, Fig 4.14), muestra diferencias altamente significativas para tratamientos y años; no se encontró diferencia significativa para la interacción tratamiento por año. El estudio de efectos simples indica que existe tendencia lineal, para el ritmo de extracción de Mg a través del tiempo, en el Testigo y CC-6m, tendencia cuadrática para las coberturas (MInga, MErythrina); no se encontró una tendencia definida en CC-4m.

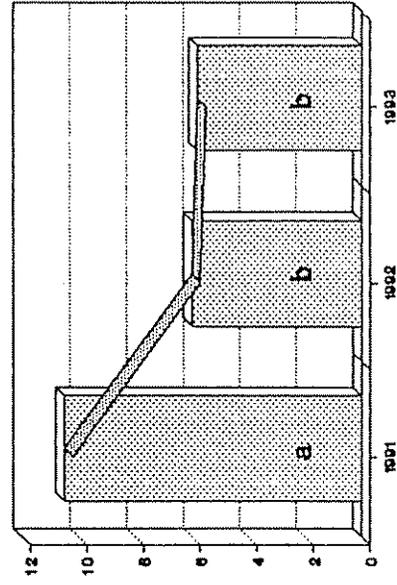
El análisis, mediante la prueba de Tukey ($\alpha = 0.05$), de la extracción de Mg por tratamientos como promedio de tres años, indica que la extracción por el tratamiento MInga (9.79 kg/ha) es superior a las extracciones de Mg por los cultivos en callejones (5.84 kg/ha en CC-6m, 4.71 kg/ha en CC-4m). La extracción anual de Mg, como promedio de los tratamientos, obtenido en el primer año (10.45 kg/ha) es superior a las extracciones obtenidas en el segundo año (5.97 kg/ha) y tercer año (5.78 kg/ha).

Los tratamientos Tradicional y cultivos en callejones, muestran una reducción bastante marcada en cuanto a la extracción de nutrimentos a través del tiempo, sobre todo de nitrógeno, fósforo y potasio. Este resultado parece estar asociado a la reducción de los rendimientos; asimismo, este cultivo a diferencia del frijol es más exigente en nutrimentos, y por su naturaleza no tiene la misma capacidad que el frijol para proveerse de nitrógeno.

Prueba de Tukey: TRATAMIENTOS



Prueba de Tukey: AÑOS



EFFECTOS SIMPLES DE AÑOS EN TRATAMIENTOS

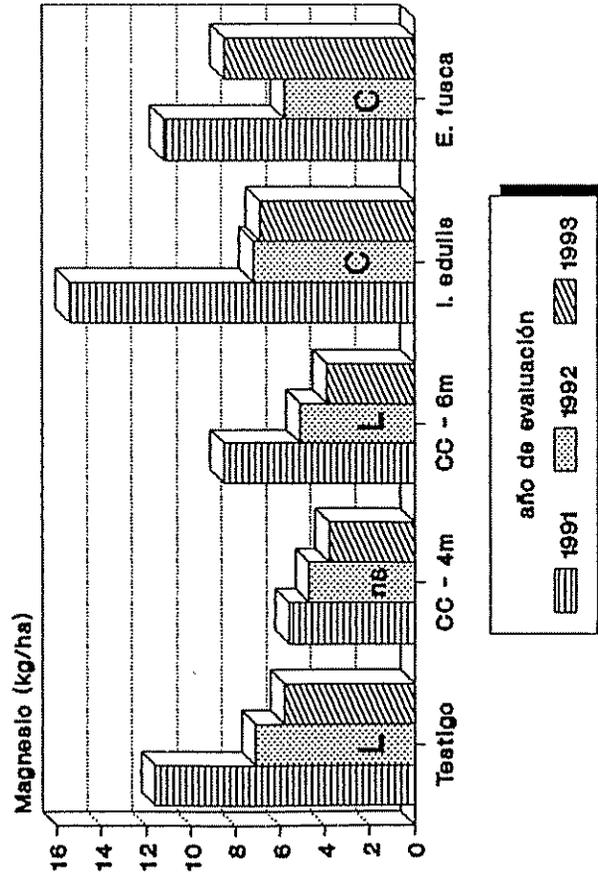


Fig 4.14 Extracción de Mg por el maíz (kg/ha), San Juan sur, Turrialba (1991 - 1993)

4.4 Balance de Nutrientos.

Balance de Nitrógeno.

El análisis de variancia (cuadro 6a, Fig 1a) para el balance de N, muestra diferencias altamente significativas para tratamientos, año, e interacción tratamiento por año. El análisis de efectos simples indica una tendencia lineal para los cultivos en callejones (CC-4m, CC-6m) y MErythrina, tendencia cuadrática para MInga y Tradicional.

Balance de Fósforo.

El análisis de variancia (cuadro 7a, Fig 2a) para el balance de P, muestra diferencias altamente significativas para tratamientos, año, e interacción tratamiento por año. El análisis de efectos simples indica una tendencia lineal para MErythrina; Para los demás tratamientos no hay una tendencia definida.

Balance de Potasio.

El análisis de variancia (cuadro 8a, Fig 3a) para el balance de K, indica diferencias altamente significativas para tratamientos, año, e interacción tratamiento por año. El análisis de efectos simples indica una tendencia lineal para los cultivos en callejones (CC-4m, CC-6m), MInga y Tradicional, y una tendencia cuadrática para MErythrina.

Balance de Calcio.

El análisis de variancia (cuadro 9a, Fig 4a) para el balance de Ca, indica diferencias altamente significativas para años y para interacción año por tratamiento; no hay diferencia entre tratamientos. El análisis de efectos simples indica una tendencia lineal para CC-6m, una tendencia cuadrática para las coberturas (MErythrina, MInga) y Tradicional; No hay tendencia definida para CC-4m.

Balance de Mg.

El análisis de variancia (cuadro 10a, Fig 5a) para el balance de Mg, indica diferencias altamente significativas para tratamientos, año, e interacción tratamiento por año. El análisis de efectos simples indica una tendencia lineal para el cultivo en callejones de cuatro metros (CC-4m), una tendencia cuadrática para las coberturas (MInga, MErythrina) y CC-6m; no hay tendencia definida para Tradicional.

El balance anual de nitrógeno, en todos los casos, arroja valores cada vez menores medida que pasan los años. En el caso de tratamiento Tradicional esta disminución parece estar relacionada con la disminución de los rendimientos, ya que de la extracción de este nutrimento por el cultivo una parte se pierde por exportación en los granos (salidas), mientras que el resto vuelve al terreno por incorporación de los residuos de cosecha (entradas).

La diferencia (cuadros 11a, 12a, 13a, 14a y 15a) en el primer año favorece a los aportes; es decir, a los nutrimentos que vuelven por incorporación de los residuos de cosecha. Esta diferencia en el tercer año resulta ser negativa para los casos de nitrógeno y fósforo; mientras que para el K, Ca y Mg a pesar de dar diferencias positivas, los valores obtenidos son mucho menores que los obtenidos en el primer año.

Un aspecto que debe tomarse en consideración es el hecho de que en este trabajo las pérdidas de nutrimentos por lixiviación, así como las pérdidas por escorrentía se han considerado como iguales para los tres años. Por esta razón la variable que determina el valor del balance es la extracción de nutrimentos dividida en entradas o aportes (incorporación de los residuos de la cosecha) y salidas (exportación por el grano en ambos cultivos).

En el caso de los cultivos en callejones la disminución en las reservas podrían deberse al decremento de los rendimientos en los cultivos y a la producción, cada vez menor, de biomasa por el componente arbóreo. En el caso de las coberturas, además del rendimiento de los cultivos, se debe a la reducción de la cantidad de material para cobertura; ésta se redujo a la mitad (8 t/ha) en el cultivo de maíz durante el segundo año, y la mitad (8 t/ha) en los dos cultivos durante el tercer año.

Los suelos tropicales ácidos no pueden sostener la producción de cultivos durante más de unos pocos años sin un aporte continuo de fertilizantes. Para mantener la productividad en estos suelos, las cantidades de nutrimentos suministrados debe superar la remoción de nutrimentos en los cultivos sucesivos (Von Uexküll 1990). Este requisito parcialmente se logra con las coberturas.

4.5 Pérdida de suelos e Índices de erosión.

4.5.1 Pérdida de suelos por erosión.

La cantidad de suelo perdido por erosión hídrica varía desde 11 kg/ha encontrados en el tratamiento con cobertura de *I. edulis* ubicado en el bloque B (MInga, bB), hasta 694 kg/ha en el cultivo en callejones de seis metros ubicado en el bloque C (CC-6m, bC).

Garzón (1991) trabajando en las mismas parcelas utilizando los mismos tratamientos, durante el ciclo del maíz, registró pérdidas que no superan en promedio los 50 kg/ha en las parcelas que recibieron algún tratamiento; Sin embargo, en las parcelas desnudas las pérdidas alcanzaron hasta 1.1 t/ha.

Otros investigadores reportan valores diferentes para terrenos comprendidos dentro del Cantón de Turrialba. Así, Romero (1991) encontró pérdidas de 28.6 t/ha/a en pendientes de 69 % con cultivo de frijol, y de 29 t/ha/a en suelo desnudo con pendientes de 58%. Rocha (1977) para pendiente de 40 % reporta pérdidas de 1.72 t/ha/a. Apolo (1980), para pendiente de 45 % reporta 1.90 t/ha/a.

El análisis de varianza (cuadro 4.7) indica que no existe diferencia entre tratamientos. Como en el caso de la escorrentía podría deberse a la alta variabilidad de respuesta entre los mismos tratamientos. Así por ejemplo, en el cultivo en callejones de seis metros (CC-6m) las pérdidas de suelo varían desde 52 kg/ha hasta 694 kg/ha, mientras que en el cultivo en callejones de cuatro metros (CC-4m) estas pérdidas son menos variables, desde 138 kg/ha hasta 245 kg/ha.

Cuadro 4.7 Análisis de varianza de la pérdida de suelos por erosión hídrica en una rotación frijol - maíz. San Juan Sur, Turrialba (1993)

Fuentes	GL	S. C.	C. M.	Fc	Pr > F
Bloque	2	93851.55	46925.77	2.33	0.1594
Trat	4	157327.41	39331.85	1.95	0.1950
error (b)	20	161079.10	20134.89		
Total	44	412258.06			

C.V. = 91.66 % Erosión media = 154.82 kg/ha

* significativo (al 5 %)

** altamente significativo (al 1 %)

Las pérdidas de suelo por erosión hídrica, ocurridas en las parcelas sometidas a los diferentes tratamientos no son comparables con las pérdidas en las parcelas desnudas (Fig 4.15) se observa que la diferencia es bastante clara. Estos resultados indican que la erosión hídrica en estos suelos mientras tengan algún tipo de cobertura no es de gravedad; sin

embargo, la exposición de estos suelos a la acción directa de la lluvia puede ser importante, puesto que las pérdidas registradas en las parcelas desnudas alcanzan hasta 19.5 t/ha (en el bloque C).

En el período del cultivo de frijol (cuadro 16a), debido a lluvias de baja intensidad la erosión llegó hasta 9.54 kg/ha en el cultivo en callejones de seis metros, mientras que en la cobertura de *I. edulis* este valor promedio es de 1.85 kg/ha. Para estos mismos tratamientos, en el cultivo de maíz las pérdidas de suelo por erosión son de 306.3 kg/ha y 21.7 kg/ha respectivamente. Las pérdidas anuales, para los tratamientos arriba mencionados, alcanzan a 330.78 kg/ha y 30.46 kg/ha respectivamente.

4.5.2 Índices de erosión.

Se probaron dos modelos, lineal y logarítmico con la finalidad de explicar las pérdidas de suelo por erosión por efecto del agua de lluvia. Los resultados (cuadro 4.8) señalan a la intensidad máxima en 30 minutos (I_{30}) y al índice modificado de Wischmeier (EI_{30m}) como las que mejor explican al logaritmo de la masa de suelo perdido por erosión (LS).

Cuadro 4.8 Modelos de regresión y coeficientes de correlación simple, para la masa de suelo erosionado (S) y su logaritmo (LS) con diferentes índices de erosividad. San Juan sur (1991).

$S = 17.744 + 0.000302(I_{30})$	$r = 0.135$ ns
$S = 105.153 + 0.000849(EI_{30})$	$r = 0.041$ ns
$S = 6.074 + 0.000196(EI_{30m})$	$r = 0.193$ **
$LS = 5.365 + 3.923(I_{30})$	$r = 0.669$ **
$LS = 50.891 + 17.090(EI_{30})$	$r = 0.302$ **
$LS = 0.272 + 1.852(EI_{30m})$	$r = 0.693$ **

Las lluvias prolongadas generalmente son de baja intensidad y de gotas pequeñas, por el contrario las lluvias de alta intensidad son cortas y compuestas de gotas grandes; asimismo, un evento cualquiera comprende periodos de alta intensidad y de baja intensidad. Estos últimos a pesar de que probablemente no provoquen ninguna erosión son consideradas en el valor EI_{30} , lo que se traduce en una sobrevaloración de este índice. Por esta razón, la mejor relación encontrada con los índices I_{30} y EI_{30} podrían deberse a que éstos sólo consideran el período más intenso de cada lluvia.

Es importante destacar el hecho de que sólo dos lluvias provocaron el 88.9 %, 52.3 % y 96.1 % de las pérdidas de suelo registradas durante el año de estudio en las parcelas desnudas de los bloques A, B y C, respectivamente (cuadro 4.9). Estas corresponden a las caídas el 17 de junio y el 3 de julio.

Cuadro 4.9 Intensidad máxima, duración de lluvia, y pérdidas de suelo por erosión hídrica en parcelas desnudas. San Juan Sur, (octubre 1992 - setiembre 1993).

Bloque	17 de junio		03 de julio	
	kg/ha	(%)	kg/ha	(%)
A	4490.6	54.6	2822.0	34.3
B	468.8	16.0	1060.5	36.3
C	14584.6	74.7	4180.9	21.4
Imáx 05´	92.4 mm/hora		43.7 mm/hora	
Imáx 30´	22.4 mm/hora		43.7 mm/hora	
Duración	230 minutos		358 minutos	

Este resultado coincide con los de Suárez (1980), quién para un lapso de 10 años determinó que sólo el 9.9 % de las lluvias fueron responsables del 88.7 % de las pérdidas de suelo. Asimismo, Roose y Lelong (1976), observaron que sólo 10 a 20 lluvias al año son responsables del mayor porcentaje de erosión en condiciones tropicales húmedas.

V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Los resultados obtenidos en el presente estudio permiten establecer las conclusiones y recomendaciones siguientes:

Conclusiones.

1. Las escorrentías registradas en las parcelas son bajas, por las mismas características físico-mineralógicas que poseen estos suelos. Esta se reduce más aún en las parcelas tratadas con las coberturas foliares de *Inga edulis* y *Erythrina fusca*.

2. Las pérdidas de nutrimentos por lixiviación son mucho más importantes que las pérdidas de éstos a través de la escorrentía superficial y/o del suelo erosionado. Estos valores de N, P, K, Ca y Mg alcanzan hasta 108, 6, 65, 362 y 29 kg/ha respectivamente. En el caso del nitrógeno, la pérdida por lixiviación de este nutrimento es aproximadamente 80 veces mayor que el perdido por erosión; esta relación alcanza a 2000 veces para los casos de calcio, potasio y magnesio.

3. El poder erosivo de la lluvia se ve ampliamente reducido por la presencia de algún tipo de cobertura vegetal, viva o muerta, sobre estos suelos. Por el contrario la exposición de éstos al impacto directo de la lluvia se traduce en un problema de mucho cuidado, porque las pérdidas de suelo por erosión sobrepasan los límites de tolerancia establecidos.

4. En el período estudiado el uso de coberturas ha mostrado una mejor estabilidad en los rendimientos obtenidos a través de los tres años de rotación. Sus efectos ya discutidos anteriormente lo sitúan como una buena alternativa para el manejo de estos suelos u otros con características similares.

5. Los resultados obtenidos en el periodo estudiado, no permiten recomendar el uso de *Erythrina fusca* en los cultivos en callejones, por su falta de adaptación a las condiciones de suelo ya descritas.

6. El balance anual para cada nutrimento, en los tratamientos estudiados revela una tendencia a la disminución en las reservas año tras año, siendo más críticos el caso del calcio. En el cultivo manejado tradicionalmente el balance para todos los nutrimentos siempre resultó negativo.

7. Entre los índices que se estudiaron los que mejor resultaron fueron la intensidad máxima en 30 minutos (I_{30}) y el índice modificado de Wischmeier ($EI_{30 m}$). Estos predicen mejor, la masa de suelo perdido por erosión hídrica (S), por medio de las relaciones siguientes:

$$\log (S) = 5.365 + 3.923 (I_{30})$$

$$\log (S) = 0.272 + 1.852 (EI_{30 m})$$

8. En el periodo estudiado, sólo dos lluvias fueron las responsables de la mayor parte de las pérdidas de suelos por erosión. Estas corresponden a 88.9 %, 52.3 % y 96.1 % en los bloques A, B y C respectivamente.

Recomendaciones.

1. Los resultados encontrados muestran la importancia que tiene la pérdida de nutrimentos del suelo en tierras de ladera por el fenómeno de lixiviación, por lo que se recomienda poner especial atención en investigaciones futuras; de ser posible, podrían utilizarse otras técnicas de medición que arrojen resultados más precisos.

2. Con el fin de obtener resultados más consistentes se recomienda para futuras investigaciones, realizar con mayor frecuencia muestreos del agua de escorrentía y del agua de infiltración, para determinar la pérdida de nutrimentos según las fases de desarrollo del cultivo.

3. Si bien los índices de erosividad I_{30} y EI_{30} m dieron buenos resultados, sería necesario realizar estudios para periodos que comprendan por lo menos cinco años de registros y bajo diferentes condiciones edafo-climáticas, ya que los modelos obtenidos corresponden a un solo año de evaluación, y en suelos con erodabilidad relativamente baja.

4. La aplicación de coberturas muertas depende del tipo de cultivo y del régimen de precipitación que domina la zona. La cantidad de cobertura para el cultivo de maíz debe ser mayor para que favorezca el control de malezas, el control de la erosión y el suministro de nutrimentos; Para el cultivo de frijol la cantidad puede ser menor dado que este cultivo por su naturaleza provee una mejor cobertura al suelo, y en el período que comprende su establecimiento en el campo, las lluvias son menos erosivas.

BIBLIOGRAFIA

- AGUIRRE, A.V. 1971. Estudio de los suelos del área del Centro Tropical de Enseñanza e investigaciones, IICA-Turrialba, Costa Rica. Tesis Mag. Sc., Turrialba, C.R., IICA/CTEI. 145 p.
- ALONSO, C.; DURAN, J.; FROMETA, E.; MARTIN, N.; GUTIERREZ, C. 1979. Compendio de suelos, tomo II. Editorial Pueblo y educación, La Habana, Cuba. 486 p.
- AMEZQUITA C., E. 1974. Estudios hidrológicos y edafológicos para conservación de aguas y suelos en Turrialba, Costa Rica. Tesis Mag. Sc. Turrialba, C.R., IICA. 138 p.
- APOLO B., W.A. 1980. Evaluación de la escorrentia superficial y la erosión en un pastizal con árboles aislados en La Suiza, Turrialba, Costa Rica. Tesis Mag. Sc. Turrialba, C.R., UCR/CATIE. 69 p.
- AYRES, Q.C. 1960. La erosión del suelo y su control. Ediciones Omega, Barcelona. 441 p.
- BARTHOLOMEW, W.V. 1975. El nitrógeno y la materia orgánica de los suelos. In M. Drosdoff, G. Aubert, J.K. Coulter. Suelos de las regiones tropicales húmedas. Centro regional de Ayuda Técnica (AID), Argentina. Ed Marymar. p 85-107.
- BENNETT, H.H. 1965. Elementos de Conservación del suelo. Fondo de cultura económica, México. 427 p.
- BERMUDEZ MENDEZ, M.M. 1980. Erosión hídrica y escorrentía superficial en el sistema café [*Coffea arabica* L.] poró [*Erythrina poeppigiana* (Walpers) O.F. Cook] y laurel [*Cordia alliodora* (R.&P.) Cham.] en Turrialba, Costa Rica. Tesis Mag. Sc. Turrialba, C.R., UCR/CATIE. 74 p.
- BERRIOS, A.T. 1965. La materia orgánica en los suelos. Agricultura de las américas. 14(7): 56-59.
- BLAIR, E. 1959. Manual de riegos y avenamiento. IICA, OEA Zona Andina. Proyecto 39 - Programa de cooperación técnica. Lima, Perú. 364 p.
- BORNEMISZA, E.; PINEDA, R. 1969. Minerales amorfos y mineralización de nitrógeno en suelos derivados de cenizas volcánicas en América Central. In panel sobre suelos derivados de cenizas volcánicas en América latina. CEI, IICA. Turrialba, C.R. B.7.1-B.7.7.

- CENTRE TECHNIQUE FORESTIER TROPICAL.** 1979. Conservation des sols au sud du Sahara. Deuxième édition. Ministère de la coopération, République Française. Collection techniques rurales en Afrique. 296 p.
- COLEGIO DE POSGRADUADOS.** 1977. Manual de conservación del suelo y del agua. Chapingo, México. 584 p.
- CONTRERAS, M.** 1991. Efecto de la cobertura muerta de *Inga Densiflora* Benht e *Inga Edulis* Mart. en el crecimiento inicial de plántulas de cafeto (*Coffea Arabica* CV Catuai) y maíz (*Zea Mays* L. Híbrido Salvadoreño H-5). Tesis Mag. Sc. Turrialba, C.R., CATIE. 142 p.
- CHABALIER, P.F.** 1984. Comparaison de deux méthodes de mesure de la lixiviation en sol ferrallitique. *L'agronomie tropicale* 39(1): 22-30.
- DOUROJEANNI, A.; PAULET, M.** 1967. La ecuación universal de pérdida de suelo y su aplicación al planeamiento del uso de las tierras agrícolas: estudio del factor de las lluvias en el Perú. Universidad Agraria, Facultad de Ing. Agrícola, Programa de Conservación de suelos. Publicación nº 2. Lima, Perú. 78 p.
- EGAWA, T.** 1980. Propiedades de los suelos derivados de cenizas volcánicas. In suelos derivdos de cenizas volcánicas en Japón. Ed Y. Ishizuka, C. Black. CIMMYT, México. 3: 68-88
- EKE, A.U.; COLEMAN, T.L.; BISHNOI, U.R.; SABOTA, C.** 1990. Soil loss under row cropping of sweet potato, soybean and two small fruit crops in northern Alabama. *Journal of sustainable agriculture* 1(1): 41-54.
- EL-SWAIFY, S.A.** 1979. Susceptibilities of certain tropical soils to erosion by water. In soil conservation and management in the humid tropics. Edited by Greenland, D.J., and Lal, R. John Wiley & Sons, Chichester, U.K. p. 49-56.
- ESPINOZA, W.; REIS, A.E. DOS.** 1984. Lixiviacao em latosolo vermelho-escuro de cerrado. II. Magnitude e variabilidade do fenomeno sob irrigacao. *Pesquisa agropecuaria brasileira*, Brasilia, 19(1): 85-94.
- EVANS, R.** 1980. Mecanismos de la erosión hídrica y sus controles espaciales y temporales: un punto de vista empírico. In *Erosión de suelos*. Compilado por M.J. Kirby, R.P.C. Morgan. Editorial Limusa, México. p. 141-163.
- FAO (ITALIA).** 1963. Soil erosion by water: some measures for its control on cultivated lands, *Agricultural Development Paper* 81, FAO, Rome.

- FAO (ITALIA). 1984. Proteger y producir: conservación del suelo para el desarrollo. FAO, Roma. 40 p.
- FASSBENDER, H.W.; BORNEMISZA, E. 1987. Química de suelos, con énfasis en suelos de América Latina. Colección de libros y materiales educativos nº 81, IICA, San José, C.R. 420 p.
- FASSBENDER, H.W. 1969. Deficiencia y fijación de fósforo en suelos derivados de cenizas volcánicas en América Central. In Panel sobre suelos derivados de cenizas volcánicas en América latina. CEI, IICA, Turrialba, C.R., B.4.1-B.4.10.
- FAUSTINO, J. 1986. Fundamentos para el manejo de cuencas: el proceso de la erosión del suelo. CATIE, PRMC. 40 p.
- FEDERACION NACIONAL DE CAFETEROS DE COLOMBIA. 1975. Manual de conservación de suelos de ladera. Centro Nacional de Investigaciones de café, Chinchiná, Colombia. 267 p.
- FINCK, A. 1985. Fertilizantes y fertilización: fundamentos y métodos para la fertilización de los cultivos. Ed. Reverté, Barcelona. 439 p.
- FORSHYTE, W.M.; GAVANDE, S.A.; GONZALES, Y.M. 1969. Propiedades físicas de los suelos derivados de cenizas volcánicas. In Panel sobre suelos derivados de cenizas volcánicas en América latina. CEI, IICA, Turrialba, C.R., B.3.1-B.3.7.
- FRERE, M.; RIJKS, J Q.; REA, J. 1975. Estudio agroclimático de la zona andina: informe técnico. Proyecto Interinstitucional FAO/UNESCO/OMM en agroclimatología, Roma. 375 p.
- GARZON, H. 1991. Evaluación de la erosión hídrica y la escorrentía superficial bajo sistemas agroforestales, en tierras de ladera, Turrialba, Costa Rica. Tesis Mag. Sc. Turrialba, C.R., CATIE. 121 p.
- GAVANDE, S.A. 1972. Física de suelos. Principios y aplicaciones. Editorial Limusa-Wiley, México. 351 p.
- GONZALES DEL TANAGO, M. 1991. La ecuación universal de pérdidas de suelo: pasado, presente y futuro. Ecología, ICONA, Madrid. 5 (1991): 13-50.
- HALLSWORTH, E G. 1987. Anatomy, physiology and psychology of erosion. John Wiley & Sons, Chichester, G.B. 176 p.
- HANSEN, E.A.; HARRIS, A.R. 1975. Validity of soil-water samples collected with porous ceramic cups. Soil Science Society of America Proceedings (EEUU) 39(3): 528-536.

- HENDRIX, P.F.; COLEMAN, D.C.; CROSSLEY Jr., D.A. 1992. Using knowledge of soil nutrient cycling processes to design sustainable agriculture. *Journal of sustainable agriculture* 1(1): 63-82.
- HOLDRIDGE, L. 1987. *Ecología basada en zonas de vida*. Ed. IICA, San José. 216 p.
- HUDSON, N. 1982. *Conservación del suelo*. Editorial Reverté, Barcelona. 335 p.
- HUDSON, N. 1977. The factors determining the extent of soil erosion. In *Soil conservation and management in the humid tropics*. Edited by D. Greenland, R. Lal. John Wiley and Sons, Chichester, U.K. p. 11-16.
- IMBACH, A C. 1987. Lixiviación de nutrimentos principales en cuatro sistemas agroforestales con cultivos perennes de Turrialba, Costa Rica. Tesis Mag. Sc. Turrialba, C.R., UCR/CATIE. 167 p.
- JIMENEZ, F.; HERNANDEZ, R. 1990. Estudio de la evapotranspiración potencial en Honduras. Proyecto Regional de agrometeorología, CATIE-CIRAD-ORSTOM. 58 p.
- JIMENEZ, F. 1993. Resumen acumulado de datos meteorológicos hasta 1992. Estación meteorológica: CATIE, Turrialba, Costa Rica, CATIE. 1 p.
- JIMENEZ, F. 1986. Balance hídrico con énfasis en perclación de dos sistemas agroforestales: Cafe-Poró y Café-Laurel, en Turrialba, Costa Rica. Tesis Mag. Sc. Turrialba, C.R., CATIE. 104 p.
- JORDAN C F. 1985. *Nutrient cycling in tropical forest ecosystems: Principles and their application in management and conservation*. John Wiley & Sons, Chichester, G.B. 190 p.
- KASS, D.; BARRANTES, A.; BERMUDEZ, W.; CAMPOS, W.; JIMENEZ, M.; SANCHEZ, J. 1989. Resultados de seis años de investigación de cultivo en callejones (alley cropping) en la Montaña, Turrialba, Costa Rica. *El Chasqui* 19: 5-24.
- KIRBY, M.J. 1984. El problema In *Erosión de suelos*. M.J. Kirby, M J., R.P.C. Morgan. Editorial Limusa, México. p 15-33.
- LAL, R. 1976. Soil erosion problems on an alfisol in Western Nigeria and their control. IITA, Monograph n° 1. Nigeria. 126 p.

- LAL, R.** 1979. Analisis of factors affecting rainfall erosivity and soil erodibility. In Soil conservation and management in the humid tropics. Edited by D.J. Greenland, R. Lal. John Wiley and Sons, Chichester, U.K. p 49-56.
- LAWRENCE, A W.** 1992. Organic mulching for increased crop productivity in the Nigerian humid tropics. Journal of sustainable agriculture 1(1): 101-106.
- LEBEUF, T.I.** 1993. Sistemas agroforestales con *Erythrina fusca* Lour. y sus efectos sobre la pérdida de suelo, la escorrentía superficial y la producción de los cultivos anuales en tierras de ladera, San Juan Sur, Turrialba, Costa Rica (Parte I). Tesis Mag. Sc., Turrialba, Costa Rica, CATIE. 112p.
- LUQUE, J A.** 1980. Hidrología agrícola aplicada. Editorial Hemisferio Sur, Buenos Aires, Argentina. 326p.
- MARAUX, F.; RAPIDEL, B.** 1990a. La simulación del balance hídrico: aplicación para la determinación de fechas de siembra. Proyecto Regional de Agrometeorología, CATIE-CIRAD-ORSTOM. CATIE, Turrialba, C.R. 31 p.
- MARAUX, F.; RAPIDEL, B.** 1990b. Paquete "AGROCLIM": guía del usuario. Proyecto Regional de Agrometeorología, CATIE-CIRAD-ORSTOM. CATIE, Turrialba, C.R. 31 p.
- MARTINI, J.A.** 1970. Caracterización del estado nutricional de los principales andosoles de Costa Rica mediante la técnica del elemento faltante en el invernadero. Turrialba 20 (1): 72-84.
- MARTINI, J.A.** 1969. Distribución geográfica y características de los suelos derivados de cenizas volcánicas en Centroamérica. In Panel sobre suelos derivados de cenizas volcánicas en América latina. CEI, IICA, Turrialba, C.R., A.5.1-A.5.19.
- MENDIETA, J A.** 1983. Influencia del cultivo de papa y zanahoria sobre la erosión de laderas en la región del volcán Barú, Panamá. Tesis Mag. Sc. Turrialba, C.R., UCR/CATIE. 102 p.
- MITCHELL, J K.; BUBENZER, G D.** 1984. Estimación de la pérdida del suelo. In Erosión de suelos. Compilado por M.J. Kirby, R.P.C. Morgan. Editorial Limusa, México. p 35-88.
- MONTENEGRO, H.; MALAGON, D.** 1990. Propiedades físicas de los suelos. Instituto Geográfico "Agustín Codazzi", Bogotá. 813 p.

- MORGAN, R.P.C. 1984. Implicaciones. In Erosión de suelos. M.J. Kirby, R.P.C. Morgan, Editorial Limusa, México. p 307-362.
- O'LOUGHLIN, C L. 1985. The effects of forest land use on erosion and slope stability. Report based on papers presented and discussed at a seminar held at the East-West Center, Honolulu, 7 - 11 may 1984. Hawaii, USA. 26 p.
- OKAJIMA, H. 1980. Propiedades de los suelos derivados de cenizas volcánicas. In suelos derivados de cenizas volcánicas en Japón. Ed por Y. Ishizuka, C. Black. CIMMYT, México. 2: 14-67.
- PNUMA (KENYA). 1987. El estado del medio ambiente en el mundo. Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente, Nairobi. 83 p.
- ROCHA, J.A. 1977. Erosión de Suelos de pendientes cultivadas con maíz y frijol con diferentes grados de cobertura viva dentro de una plantación forestal. Tesis Mag. Sc. Turrialba, C.R., UCR/CATIE. 182 p.
- ROMERO, E.G. 1991. Evaluación de las medidas demostrativas de conservación de suelos en la finca "La selva" Cuenca del Rio Tuis, Costa Rica. Tesis Mag. Sc., Turrialba, C.R., CATIE. 106 p.
- ROOSE, E.; LELONG, F. 1976. Les facteurs de l'érosion hydrique en Afrique Tropicale. Etudes sur petites parcelles experimentales de sols. Revue de Geographie Physique et de geologie dynamique 18(4): 365-374.
- SANCHEZ, P.A. 1981. Suelos del trópico, características y manejo. Serie de libros y materiales educativos nº 48, IICA, San José. 634 p.
- SANCHEZ, J.F. 1989. Análisis de la estabilidad y dinámica de sistemas de producción de cultivos en callejones. Tesis Mag. Sc. Turrialba, C.R., CATIE. 174 p.
- SANCHEZ, C.; MARTIN, L. 1980. Estudio del suelo. IOATO, temas de divulgación Centro de edafología y biología aplicada. Salamanca. 38 p.
- SANCHEZ, H.R. 1993. Comportamiento de leguminosas de cobertura en el establecimiento del cultivo de plátano (Musa AAB grupo, subgrupo plátano, c.v. Curraré). Tesis Mag. Sc. Turrialba, C.R., CATIE. 72 p.
- SARAGONI, H.; POSS, R.; OLIVER, R. 1990. Dynamique et lixiviation des éléments minéraux dans les terres de barre du sud du Togo. L'agronomie tropicale 45(4): 259-273.

- SILVESTRE, G.; COLLINET, J.; TINEO, A. 1993. Pruebas de Infiltración y percolación del agua en suelos de San Juan Sur, Turrialba. CATIE. s. n.
- SOIL SCIENCE SOCIETY OF AMERICA. 1979. Glossary of soil science terms. Madison, Wisconsin, SSSA. 37 p.
- STEEL, R.; TORRIE, J. 1989. Bioestadística: Principios y procedimientos. Ed. Mc Graw Hill, México. 622 p.
- SUAREZ, F. 1980. Conservación de suelos. Serie de libros y materiales educativos n° 37. Editorial IICA. San José. 315 p
- THOMPSON, L M.; TROEH, F R. 1982. Los suelos y su fertilidad. cuarta edición. Editorial Reverté, Barcelona. 649 p.
- THORNES, J.B. 1980. Procesos erosivos de las corrientes de agua y sus controles espaciales y temporales: un punto de vista teórico. In Erosión de suelos. compilado por M.J. Kirby, R.P.C. Morgan. Editorial Limusa, México. p 165-225.
- TINEO, B. 1993. Polinomios ortogonales: notas de estudio. Consejo estudiantil, CATIE. Turrialba, C.R. CATIE. 34 p.
- . 1992a. Física de suelos, algunos elementos teórico-prácticos. Universidad Nacional de San Cristobal de Huamanga, Ayacucho, Perú. 53 p.
- . 1992b. Caracterización del estado nutricional de los suelos agrícolas de San Juan Sur, Turrialba, Costa Rica, mediante la técnica del elemento faltante. CATIE. 32 p.
- VON UEXKULL, H R. 1990. El uso eficaz de los fertilizantes en los suelos ácidos de las tierras altas de los trópicos húmedos. Boletín FAO: fertilizantes y nutrición vegetal n° 10. FAO, Roma. 64 p.
- WAGNER, G.H. 1962. Use of porous ceramic cups to sample soil water within the profile. Soil Science (EEUU) 94(6): 379-386.
- WIERSUM, K.F. *et al.* 1979. Influence of forest on erosion; Report of seminary: the erosion problem in the Jatiluhur. Institute of ecology, Padjadjaran University, Indonesia. 44 p.
- WISCHMEIER, W.H.; SMITH, D.D. 1978. Predicting rainfall erosion losses: A guide to conservation planning. USDA, Agricultural Handbook n° 537. Wahington. 58 p.

WOOD, W. 1973. A technique using porous cups for water sampling at any depth in the unsaturated zone. Water Resources Research (EEUU) 9: 486-488.

YOUNG, A. 1989. Agroforestry for soil conservation. CAB International, Wallingford, U.K. 276 p.

ANEXOS

Cuadro 1a. Análisis de varianza de la extracción de Nitrógeno por los cultivos de frijol y maíz. San Juan Sur, Turrialba (1991 - 1993).

Cuadro 1a(a). Análisis de varianza para frijol (corregido).

Fuentes	G.L.	S. C.	C. M.	Fc	Pr > F
Bloque	2	1377.037	688.52	2.11	0.1838
Trat	4	12675.518	3168.88	9.70	0.0037
error (a)	8	2612.170	326.52	2.38	0.0555
Año	2	441.257	220.63	1.61	0.2253
Trat*Año	8	3182.911	397.86	2.90	0.0255
Testigo (L)	1	442.042	442.04	3.22	0.0879
Testigo (C)	1	0.053	0.05	0.00	0.9845
CC-4m (L)	1	2.912	2.91	0.02	0.8857
CC-4m (C)	1	10.397	10.40	0.08	0.7860
CC-6m (L)	1	320.324	320.32	2.33	0.1423
CC-6m (C)	1	25.063	25.06	0.18	0.6737
Minga (L)	1	705.250	705.25	5.14	0.0347
Minga (C)	1	324.360	324.36	2.36	0.1399
MErythrina (L)	1	1323.135	1323.14	9.64	0.0056
MErythrina (C)	1	470.631	470.63	3.43	0.0789
error (b)	20	2745.517	137.28		
Total	44	23034.411			

C.V. = 19.27 %

Ext. Nitrógeno (promedio) = 60.80 kg/ha

Cuadro 1a(b). Análisis de varianza para maíz.

Fuentes	G.L.	S. C.	C. M.	Fc	Pr > F
Bloque	2	2910.711	1455.36	14.31	0.0023
Trat	4	7651.602	1912.90	18.81	0.0004
error (a)	8	813.733	101.72	0.60	0.7651
Año	2	8840.558	4420.28	26.17	0.0001
Trat*Año	8	2005.887	250.74	1.48	0.2244
Testigo (L)	1	2082.461	2082.46	12.33	0.0022
Testigo (C)	1	16.704	16.70	0.10	0.7564
CC-4m (L)	1	613.070	613.07	3.63	0.0712
CC-4m (C)	1	11.472	11.47	0.07	0.7970
CC-6m (L)	1	1960.595	1960.60	11.61	0.0028
CC-6m (C)	1	29.851	29.85	0.18	0.6787
Minga (L)	1	3989.197	3989.20	23.62	0.0001
Minga (C)	1	1030.429	1030.43	6.10	0.0226
MErythrina (L)	1	552.768	552.77	3.27	0.0855
MErythrina (C)	1	559.897	559.90	3.32	0.0836
error (b)	20	3377.571	168.88		
Total	44	25600.062			

C.V. = 23.06 %

Ext. Nitrógeno (promedio) = 56.37 kg/ha

Cuadro 2a. Análisis de varianza de la extracción de Fósforo por los cultivos de frijol y maíz. San Juan Sur, Turrialba (1991 - 1993).

Cuadro 2a(a). Análisis de varianza para frijol (corregido).

Fuentes	G.L.	S. C.	C. M.	Fc	Pr > F
Bloque	2	5.903	2.951	1.31	0.3212
Trat	4	83.639	20.910	9.31	0.0042
error (a)	8	17.976	2.247	1.62	0.1811
Año	2	20.068	10.034	7.24	0.0043
Trat*Año	8	35.421	4.428	3.19	0.0167
Testigo (L)	1	7.866	7.866	5.67	0.0273
Testigo (C)	1	0.911	0.911	0.66	0.4270
CC-4m (L)	1	0.660	0.660	0.48	0.4981
CC-4m (C)	1	0.013	0.013	0.01	0.9228
CC-6m (L)	1	6.161	6.161	4.44	0.0478
CC-6m (C)	1	0.712	0.712	0.51	0.4818
MInga (L)	1	11.344	11.344	8.18	0.0097
MInga (C)	1	14.670	14.670	10.58	0.0040
MErythrina (L)	1	4.950	4.950	3.57	0.0734
MErythrina (C)	1	8.201	8.201	5.92	0.0245
error (b)	20	27.723	1.386		
Total	44	190.731			

C.V. = 21.67 % Ext. Fósforo (promedio) = 5.43 kg/ha

Cuadro 2a(b). Análisis de varianza para maíz.

Fuentes	G.L.	S. C.	C. M.	Fc	Pr > F
Bloque	2	157.993	78.997	17.04	0.0013
Trat	4	201.622	50.406	10.87	0.0026
error (a)	8	37.086	4.636	0.81	0.6044
Año	2	198.043	99.021	17.23	0.0001
Trat*Año	8	83.197	10.400	1.81	0.1345
Testigo (L)	1	44.663	44.663	7.77	0.0114
Testigo (C)	1	1.212	1.212	0.21	0.6510
CC-4m (L)	1	16.269	16.269	2.83	0.1080
CC-4m (C)	1	0.399	0.399	0.07	0.7948
CC-6m (L)	1	47.545	47.545	8.27	0.0093
CC-6m (C)	1	0.008	0.008	0.00	0.9698
MInga (L)	1	75.686	75.686	13.17	0.0017
MInga (C)	1	46.240	46.240	8.05	0.0102
MErythrina (L)	1	9.375	9.375	1.63	0.2161
MErythrina (C)	1	39.843	39.843	6.93	0.0159
error (b)	20	114.916	5.746		
Total	44	792.856			

C.V. = 25.20 % Ext. Fósforo (promedio) = 9.51 kg/ha

Cuadro 3a. Análisis de varianza de la extracción de Potasio por los cultivos de frijol y maíz. San Juan Sur, Turrialba (1991 - 1993).

Cuadro 3a(a). Análisis de varianza para frijol (corregido).

Fuentes	G.L.	S. C.	C. M.	Fc	Pr > F
Bloque	2	1489.760	744.88	2.12	0.1820
Trat	4	16342.831	4085.71	11.65	0.0020
error (a)	8	2805.075	350.63	1.97	0.1041
Año	2	4568.684	2284.34	12.85	0.0003
Trat*Año	8	4262.714	532.84	3.00	0.0221
Testigo (L)	1	1852.932	1852.93	10.43	0.0042
Testigo (C)	1	7.947	7.95	0.04	0.8347
CC-4m (L)	1	193.574	193.57	1.09	0.3091
CC-4m (C)	1	1.027	1.03	0.01	0.9402
CC-6m (L)	1	790.283	790.28	4.45	0.0478
CC-6m (C)	1	226.561	226.56	1.27	0.2722
MInga (L)	1	5594.928	5594.93	31.48	0.0001
MInga (C)	1	11.488	11.49	0.06	0.8019
MErythrina (L)	1	77.544	77.54	0.44	0.5164
MErythrina (C)	1	75.113	75.11	0.42	0.5230
error (b)	20	3554.376	177.72		
Total	44	33023.440			

C.V. = 23.75 % Ext. Potasio (promedio) = 56.13 kg/ha

Cuadro 3a(b). Análisis de varianza para maíz.

Fuentes	G.L.	S. C.	C. M.	Fc	Pr > F
Bloque	2	7012.156	3506.08	21.14	0.0006
Trat	4	7999.237	1999.81	12.06	0.0018
error (a)	8	1326.533	165.82	1.15	0.3750
Año	2	15964.398	7982.20	55.33	0.0001
Trat*Año	8	3745.617	468.20	3.25	0.0155
Testigo (L)	1	4025.378	4025.38	27.91	0.0001
Testigo (C)	1	0.076	0.08	0.00	0.9819
CC-4m (L)	1	575.848	575.85	3.99	0.0595
CC-4m (C)	1	73.852	73.85	0.51	0.4826
CC-6m (L)	1	3082.213	3082.21	21.37	0.0002
CC-6m (C)	1	191.623	191.62	1.33	0.2627
MInga (L)	1	7114.615	7114.62	49.32	0.0001
MInga (C)	1	1250.167	1250.17	8.67	0.0080
MErythrina (L)	1	1236.683	1236.68	8.57	0.0083
MErythrina (C)	1	2159.559	2159.56	14.97	0.0010
error (b)	20	2885.056	144.25		
Total	44	38932.997			

C.V. = 21.34 % Ext. Potasio (promedio) = 56.29 kg/ha

Cuadro 4a. Análisis de varianza de la extracción de Calcio por los cultivos de frijol y maíz. San Juan Sur, Turrialba (1991 - 1993).

Cuadro 4a(a). Análisis de varianza para frijol (corregido).

Fuentes	G.L.	S. C.	C. M.	Fc	Pr > F
Bloque	2	394.863	197.43	0.98	0.4174
Trat	4	3586.998	896.75	4.44	0.0350
error (a)	8	1617.427	202.18	2.51	0.0454
Año	2	815.677	407.84	5.06	0.0166
Trat*Año	8	1803.357	225.42	2.80	0.0295
Testigo (L)	1	608.228	608.23	7.55	0.0124
Testigo (C)	1	482.880	482.88	6.00	0.0237
CC-4m (L)	1	3.937	3.94	0.05	0.8273
CC-4m (C)	1	7.894	7.89	0.10	0.7575
CC-6m (L)	1	303.313	303.31	3.77	0.0665
CC-6m (C)	1	204.694	204.69	2.54	0.1265
MInga (L)	1	628.531	628.53	7.81	0.0112
MInga (C)	1	9.374	9.37	0.12	0.7365
MErythrina (L)	1	119.975	119.97	1.49	0.2364
MErythrina (C)	1	250.208	250.21	3.11	0.0932
error (b)	20	1610.496	80.52		
Total	44	9828.817			

C.V. = 25.15 % Ext. de Calcio (promedio) = 35.69 kg/ha

Cuadro 4a(b). Análisis de varianza para maíz.

Fuentes	G.L.	S. C.	C. M.	Fc	Pr > F
Bloque	2	115.352	57.68	6.01	0.0255
Trat	4	345.546	86.39	9.01	0.0047
error (a)	8	76.723	9.59	0.70	0.6879
Año	2	760.122	380.06	27.74	0.0001
Trat*Año	8	100.684	12.59	0.92	0.5216
Testigo (L)	1	77.760	77.76	5.68	0.0272
Testigo (C)	1	99.217	99.22	7.24	0.0140
CC-4m (L)	1	37.101	37.10	2.71	0.1154
CC-4m (C)	1	43.618	43.62	3.18	0.0895
CC-6m (L)	1	119.617	119.62	8.73	0.0078
CC-6m (C)	1	47.596	47.60	3.47	0.0771
MInga (L)	1	170.240	170.24	12.43	0.0021
MInga (C)	1	151.961	151.96	11.09	0.0033
MErythrina (L)	1	3.286	3.29	0.24	0.6296
MErythrina (C)	1	110.410	110.41	8.06	0.0101
error (b)	20	273.968	13.70		
Total	44	1672.395			

C.V. = 27.30 % Ext. de Calcio (promedio) = 13.56 kg/ha

Cuadro 5a. Análisis de varianza de la extracción de Magnesio por los cultivos de frijol y maíz. San Juan Sur, Turrialba (1991 - 1993).

Cuadro 5a(a). Análisis de varianza para (corregido).

Fuentes	G.L.	S. C.	C. M.	Fc	Pr > F
Bloque	2	87.088	43.54	6.22	0.0234
Trat	4	180.241	45.06	6.44	0.0128
error (a)	8	55.979	7.00	1.48	0.2253
Año	2	166.980	83.49	17.68	0.0001
Trat*Año	8	59.465	7.43	1.57	0.1950
Testigo (L)	1	56.365	56.37	11.94	0.0025
Testigo (C)	1	0.661	0.66	0.14	0.7122
CC-4m (L)	1	7.571	7.57	1.60	0.2200
CC-4m (C)	1	0.520	0.52	0.11	0.7434
CC-6m (L)	1	38.002	38.00	8.05	0.0102
CC-6m (C)	1	0.075	0.07	0.02	0.9011
MInga (L)	1	93.536	93.54	19.81	0.0002
MInga (C)	1	14.418	14.42	3.05	0.0959
MErythrina (L)	1	3.745	3.74	0.79	0.3838
MErythrina (C)	1	11.552	11.55	2.45	0.1335
error (b)	20	94.436	4.72		
Total	44	644.190			

C.V. = 30.60 % Ext. Magnesio (promedio) = 7.10 kg/ha

Cuadro 5a(b). Análisis de varianza para maíz.

Fuentes	G.L.	S. C.	C. M.	Fc	Pr > F
Bloque	2	155.079	77.54	28.77	0.0002
Trat	4	154.994	38.75	14.38	0.0010
error (a)	8	21.561	2.70	0.55	0.8023
Año	2	209.566	104.78	21.53	0.0001
Trat*Año	8	67.997	8.50	1.75	0.1486
Testigo (L)	1	49.939	49.94	10.26	0.0045
Testigo (C)	1	5.131	5.13	1.05	0.3168
CC-4m (L)	1	4.860	4.86	1.00	0.3296
CC-4m (C)	1	0.004	0.00	0.00	0.9781
CC-6m (L)	1	31.786	31.79	6.53	0.0188
CC-6m (C)	1	2.297	2.30	0.47	0.5000
MInga (L)	1	108.545	108.55	22.31	0.0001
MInga (C)	1	31.258	31.26	6.42	0.0197
MErythrina (L)	1	10.613	10.61	2.18	0.1553
MErythrina (C)	1	33.130	33.13	6.81	0.0168
error (b)	20	97.328	4.87		
Total	44	706.524			

C.V. = 29.81 % Ext. Magnesio (promedio) = 7.40 kg/ha

Cuadro 6a Análisis de varianza para el balance de Nitrógeno.
San Juan Sur (1991 - 1993).

Fuentes	GL	S. C.	C. M.	Fc	Pr > F
Bloque	2	9374.68	4687.34	1.74	0.2356
Trat	4	527235.87	131808.97	48.96	0.0001**
error (a)	8	21536.68	2692.08	9.52	0.0001
Año	2	69897.63	34948.82	123.65	0.0001**
Trat*Año	8	73196.25	9149.53	32.37	0.0001**
Testigo (L)	1	273.28		0.97	0.3372
Testigo (C)	1	5057.40		17.89	0.0004**
CC-4m (L)	1	8458.89		29.93	0.0001**
CC-4m (C)	1	750.36		2.65	0.1189
CC-6m (L)	1	8839.99		31.28	0.0001**
CC-6m (C)	1	246.04		0.87	0.3620
MInga (L)	1	1066.05		3.77	0.0663
MInga (C)	1	1980.91		7.01	0.0155*
MErythrina(L)	1	115859.01		409.90	0.0001**
MErythrina(C)	1	561.96		1.99	0.1739
error (b)	20	5653.05	282.65		
Total	44	706894.16			

C.V. = 14.04 % Baln. promedio = 119.75 kg/ha

* significativo (al 5 %)

** altamente significativo (al 1 %)

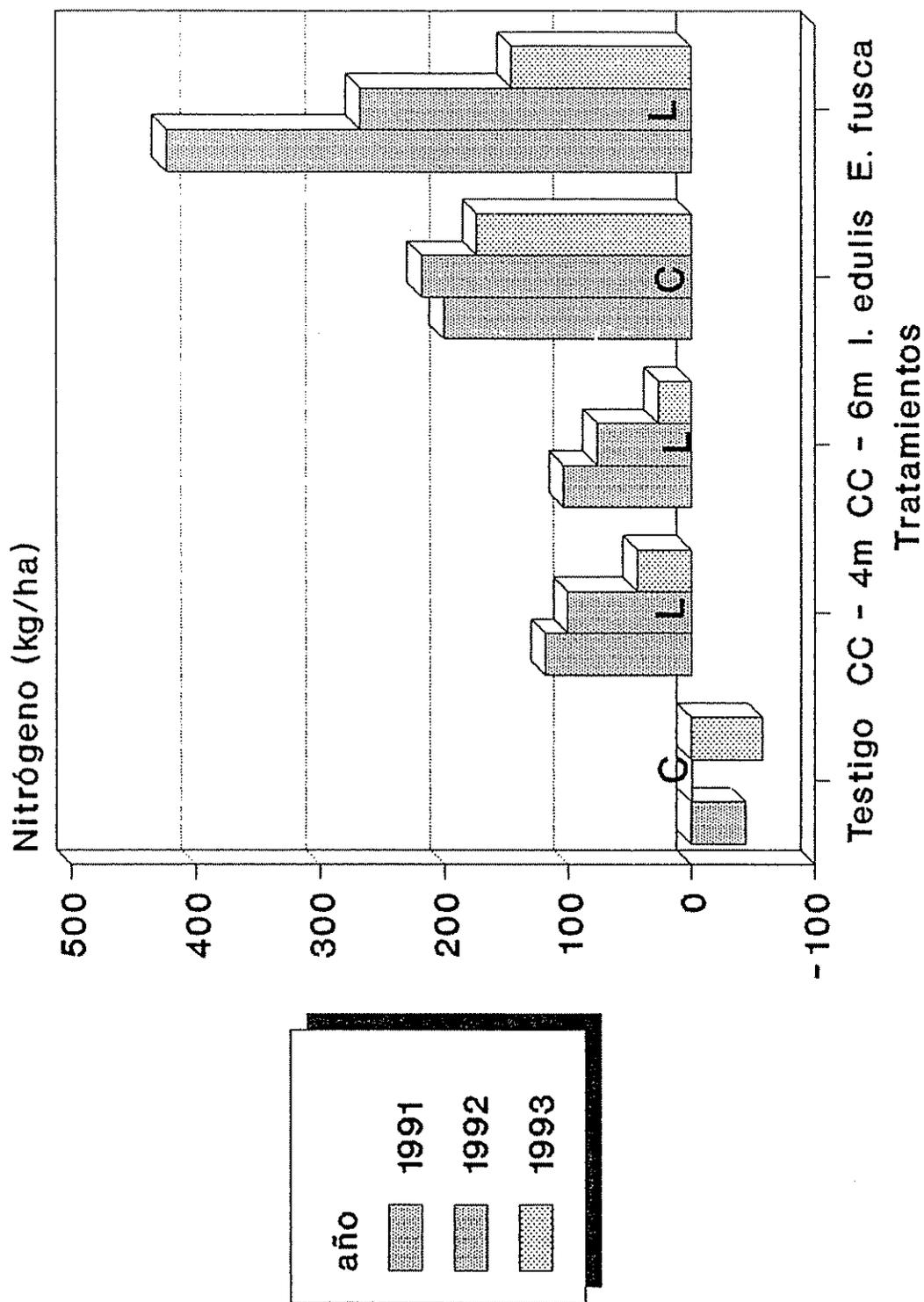


Fig 1a Balance de N en una rotación frijol - maíz, San Juan Sur (1991 - 1993)

Cuadro 7a Análisis de variación para el balance de Fósforo.
San Juan Sur (1991 - 1993).

Fuentes	GL	S. C.	C. M.	Fc	Pr > F
Bloque	2	61.06	30.53	1.14	0.3655
Trat	4	2073.52	518.40	19.43	0.0004**
error (a)	8	213.39	26.67	6.70	0.0003
Año	2	164.25	82.12	20.63	0.0001**
Trat*Año	8	462.13	57.77	14.51	0.0001**
Testigo (L)	1	4.69		1.18	0.2908
Testigo (C)	1	3.22		0.81	0.3791
CC-4m (L)	1	0.08		0.02	0.8909
CC-4m (C)	1	0.22		0.05	0.8181
CC-6m (L)	1	13.40		3.37	0.0815
CC-6m (C)	1	6.05		1.52	0.2321
Minga (L)	1	4.74		1.19	0.2879
Minga (C)	1	4.37		1.10	0.3072
MErythrina(L)	1	575.83		144.67	0.0001**
MErythrina(C)	1	13.79		3.46	0.0775
error (b)	20	79.60	3.98		
Total	44	3053.95			

C.V. = 30.13 % Baln. promedio = 6.62 kg/ha

* significativo (al 5 %)

** altamente significativo (al 1 %)

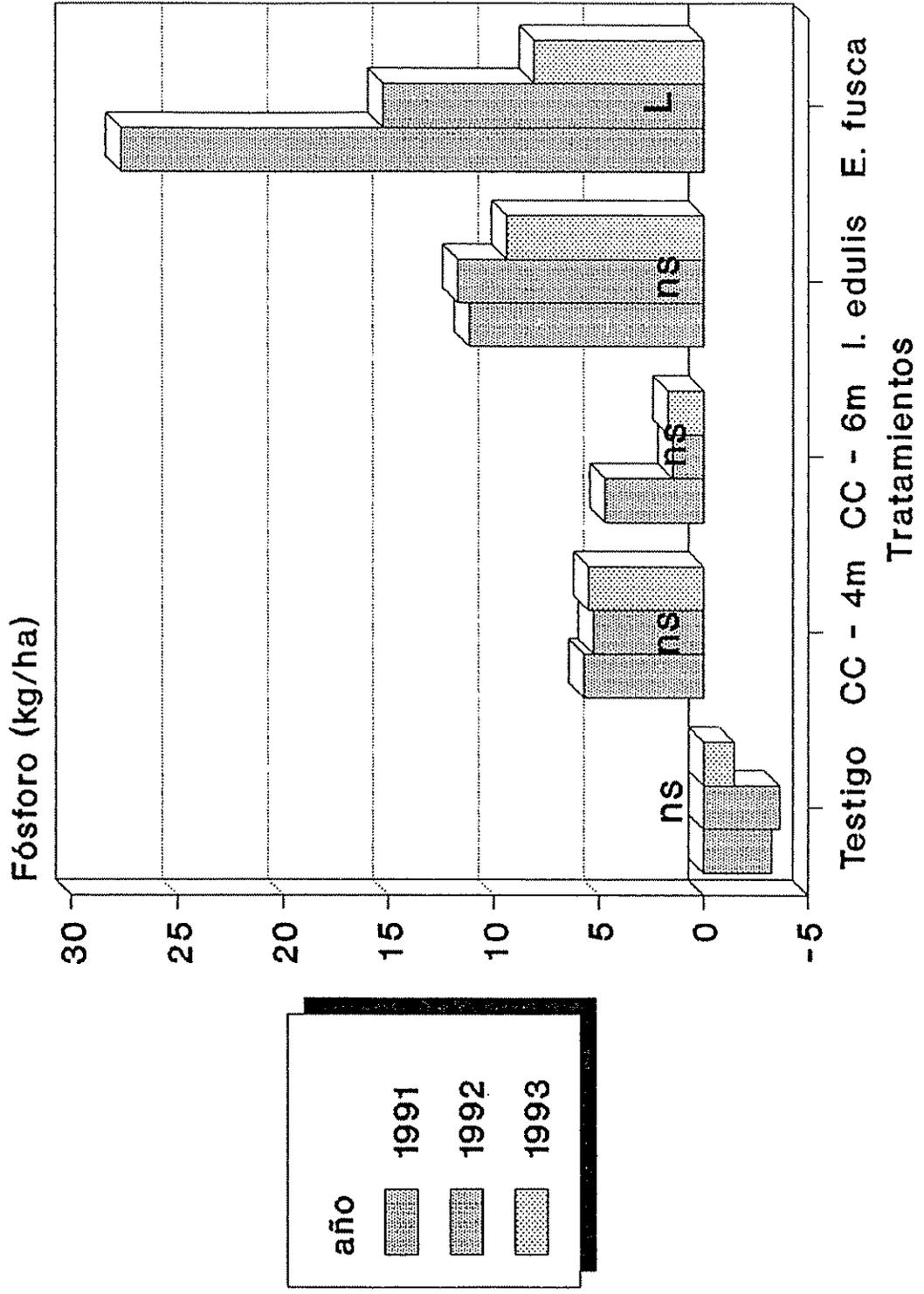


Fig 2a Balance de P, en una rotación frijol - maíz, San Juan Sur (1991 - 1993)

Cuadro 8a Análisis de varianza para el balance de Potasio.
San Juan Sur (1991 - 1993).

Fuentes	GL	S. C.	C. M.	Fc	Pr > F
Bloque	2	23500.06	11750.03	6.81	0.0187*
Trat	4	97915.42	24478.86	14.19	0.0010**
error (a)	8	13800.78	1725.10	7.43	0.0001
Año	2	38287.63	19143.81	82.48	0.0001**
Trat*Año	8	19952.89	2494.11	10.75	0.0001**
Testigo (L)	1	1267.19		5.46	0.0300*
Testigo (C)	1	186.12		0.80	0.3812
CC-4m (L)	1	1450.66		6.25	0.0218*
CC-4m (C)	1	934.98		4.03	0.0585
CC-6m (L)	1	4973.36		21.04	0.0002**
CC-6m (C)	1	758.82		3.27	0.0857
MInga (L)	1	3698.09		15.93	0.0007**
MInga (C)	1	965.72		4.16	0.0548
MErythrina(L)	1	40318.42		173.70	0.0003**
MErythrina(C)	1	3687.11		15.88	0.0007**
error (b)	20	4642.33	232.12		
Total	44	198099.11			

C.V. = 25.46 % Baln. promedio = 59.83 kg/ha

* significativo (al 5 %)

** altamente significativo (al 1 %)

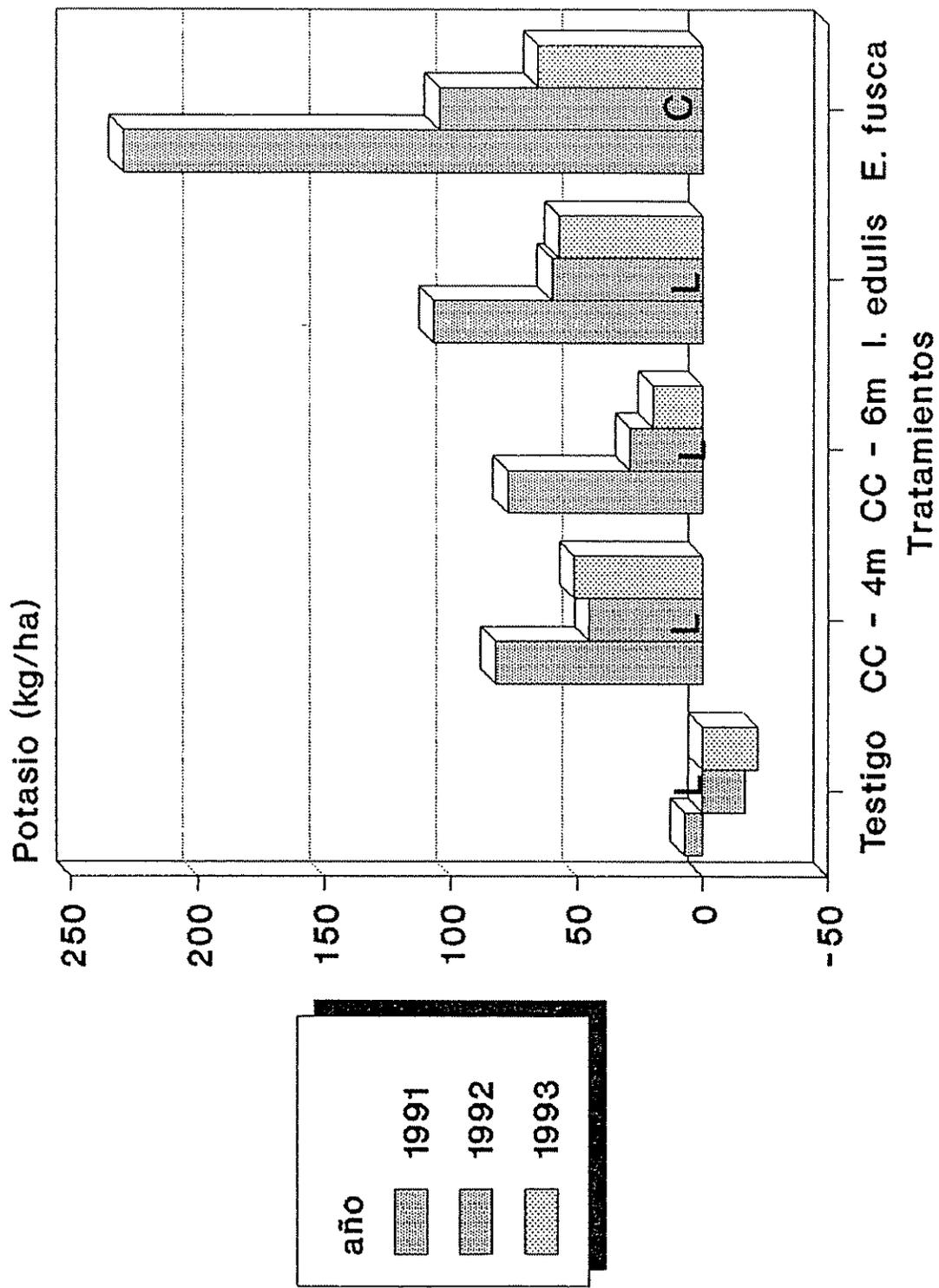


Fig 3a Balance de Potasio en una rotación frijol - maíz , San Juan Sur (1991 - 1993)

Cuadro 9a Análisis de varianza para el balance de Calcio.
San Juan Sur (1991 - 1993).

Fuentes	GL	S. C.	C. M.	Fc	Pr > F
Bloque	2	34747.99	17374.00	1.05	0.3948
Trat	4	123973.18	30993.29	1.87	0.2098
error (a)	8	132841.91	16605.24	236.51	0.0001**
Año	2	13094.31	6547.16	93.25	0.0001**
Trat*Año	8	8352.78	1044.10	14.87	0.0001**
Testigo (L)	1	397.70		5.66	0.0274*
Testigo (C)	1	325.03		4.63	0.0438*
CC-4m (L)	1	66.58		0.95	0.3418
CC-4m (C)	1	64.63		0.92	0.3488
CC-6m (L)	1	730.94		10.41	0.0042**
CC-6m (C)	1	209.84		2.99	0.0993
MInga (L)	1	615.24		8.76	0.0077**
MInga (C)	1	5501.06		78.35	0.0001**
MErythrina(L)	1	3243.00		46.19	0.0001**
MErythrina(C)	1	10293.06		146.61	0.0001**
error (b)	20	1404.18	70.21		
Total	44	314414.34			

C.V. = -9.02 % Baln. promedio = -92.89 kg/ha

* significativo (al 5 %)

** altamente significativo (al 1 %)

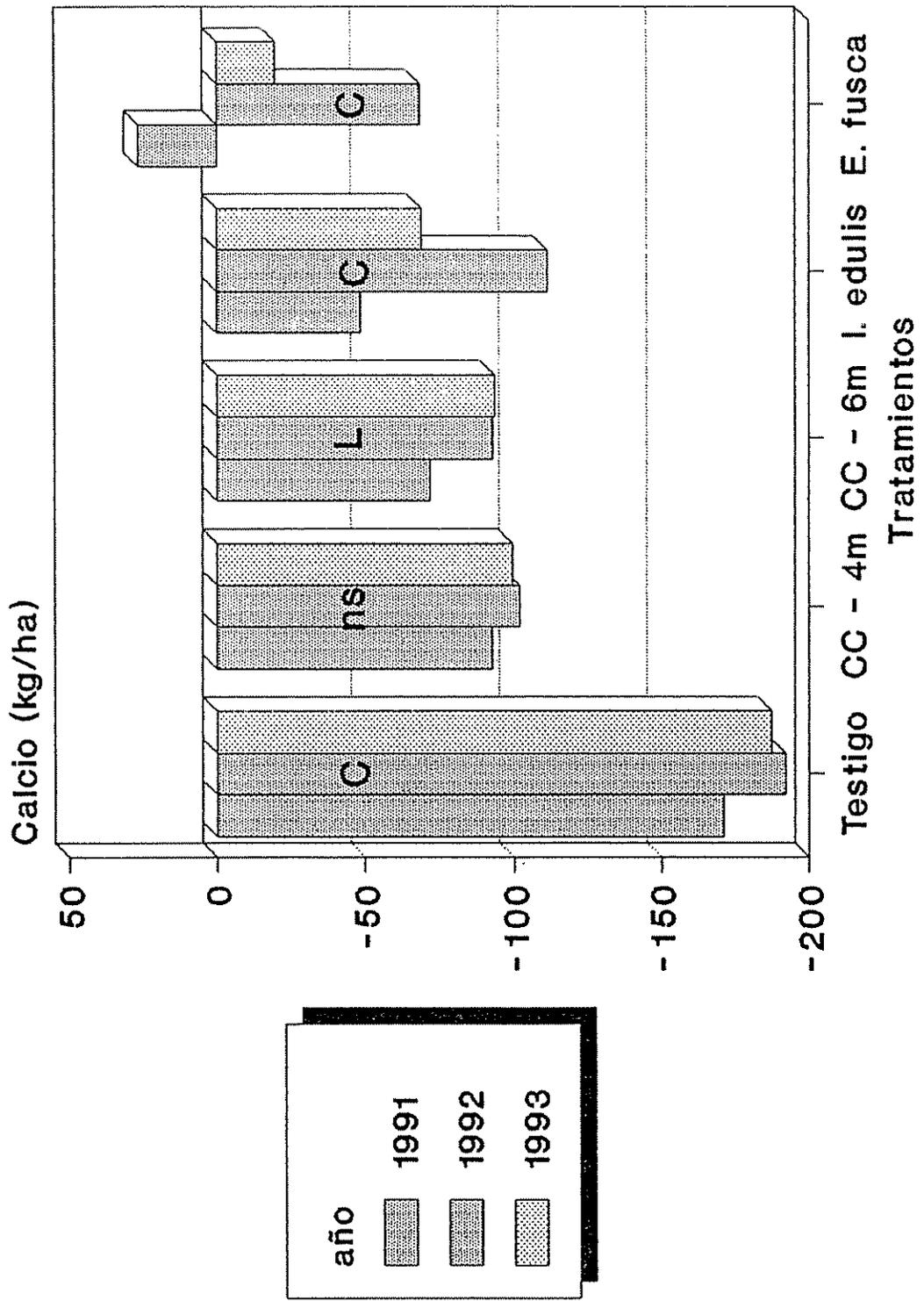


Fig 4a Balance de Ca, en una rotación frijol - maíz, San Juan Sur (1991 - 1993)

Cuadro 10a Análisis de varianza para el balance de Magnesio.
San Juan Sur (1991 - 1993).

Fuentes	GL	S. C.	C. M.	Fc	Pr > F
Bloque	2	120.05	60.03	0.37	0.7031
Trat	4	5411.90	1352.97	8.30	0.0060**
error (a)	8	1304.22	163.03	38.86	0.0001**
Año	2	1114.91	557.45	132.87	0.0001**
Trat*Año	8	604.86	75.61	18.02	0.0001**
Testigo (L)	1	16.88		4.02	0.0586
Testigo (C)	1	14.57		3.47	0.0771
CC-4m (L)	1	44.31		10.56	0.0040**
CC-4m (C)	1	17.30		4.12	0.0558
CC-6m (L)	1	77.46		18.46	0.0004**
CC-6m (C)	1	21.77		5.19	0.0339*
MInga (L)	1	180.97		43.14	0.0001**
MInga (C)	1	62.93		15.00	0.0009**
MErythrina(L)	1	1019.28		242.96	0.0001**
MErythrina(C)	1	264.28		62.99	0.0001**
error (b)	20	83.91	4.20		
Total	44	8639.85			

C.V. = 285.59 % Baln. promedio = 0.72 kg/ha

* significativo (al 5 %)

** altamente significativo (al 1 %)

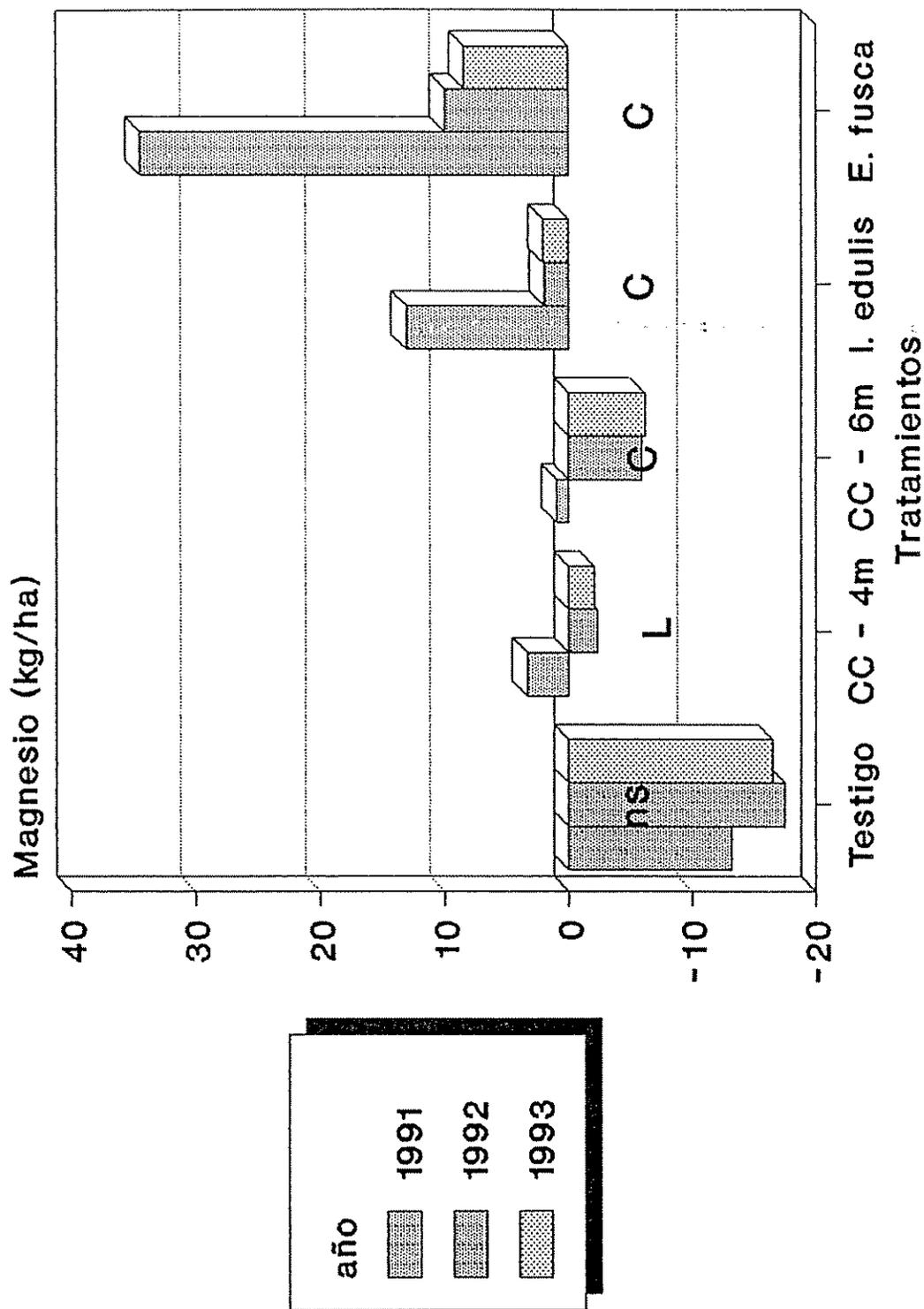


Fig 6a Balance de Mg, en una rotación frijol - maíz, San Juan Sur (1991 - 1993)

Cuadro 11a Balance anual de nitrógeno en una rotación frijol - maíz. San Juan Sur, Turrialba (1990 - 1993).

BALANCE DE NITROGENO (AÑO 1)

TRAT	MULCH-F	CULTIVO DE FRIJOL		MULCH-M	CULTIVO DE MAIZ		ENTRADA POR LLUVIA = 0.000		
	ENTRADA	ENTRADA	SALIDA	ENTRADA	ENTRADA	SALIDA	EROSION	ESCORRIE*	LLUVIA*
A1	0.000	36.631	24.050	0.000	40.234	28.061	4.600	0.026	33.212
A2	0.000	12.766	15.120	123.319	24.069	25.030	2.800	0.114	38.174
A3	0.000	34.254	32.040	144.148	49.806	23.637	0.700	0.036	43.104
A4	107.145	60.488	42.123	107.145	67.775	37.454	0.500	0.046	66.342
A5	225.182	33.782	26.620	225.182	45.017	32.944	0.500	0.046	76.464
B1	0.000	35.247	32.339	0.000	56.833	36.054	2.000	0.031	108.614
B2	0.000	24.787	17.160	162.371	26.209	10.973	30.400	0.106	50.216
B3	0.000	27.106	15.424	96.630	27.823	29.348	5.300	0.374	18.604
B4	107.145	49.413	51.683	107.145	55.727	43.531	1.800	0.047	21.748
B5	225.182	26.366	27.236	225.182	34.245	22.463	0.400	0.078	26.734
C1	0.000	32.135	25.792	0.000	35.557	31.701	0.300	0.059	40.681
C2	0.000	32.126	22.781	211.001	42.076	17.711	0.300	0.066	56.057
C3	0.000	27.418	23.364	151.524	34.305	34.926	0.500	1.299	53.639
C4	107.145	52.279	53.316	107.145	77.099	46.324	0.000	0.033	39.935
C5	225.182	33.512	37.433	225.182	55.640	41.266	0.100	0.027	19.213

*: TOMADOS DE AÑO 3

RESUMEN		BALANCE GENERAL
ENTRADA	SALIDAS	
76.766	90.948	-14.184
160.184	81.239	78.945
226.207	99.515	126.692
342.552	146.465	196.087
529.182	136.504	392.678
92.079	178.937	-86.858
203.367	108.657	94.710
151.859	69.048	82.811
319.430	118.909	200.520
512.975	76.943	436.032
67.692	96.534	-28.842
285.200	102.945	182.255
213.246	113.719	99.527
343.668	139.009	204.659
539.515	99.080	440.435

BALANCE DE NITROGENO (AÑO 2)

TRATAM	MULCH-F	CULTIVO DE FRIJOL		MULCH-M	CULTIVO DE MAIZ		ENTRADA POR LLUVIA = 0.000		
	ENTRADA	ENTRADA	SALIDAS	ENTRADA	ENTRADA	SALIDAS	EROSION	ESCORRIE*	LLUVIA*
A1	0.000	9.862	4.628	0.000	20.293	26.919	0.697	0.000	33.212
A2	43.970	16.723	12.054	21.220	13.964	12.962	0.400	0.240	38.174
A3	50.831	18.315	8.352	27.829	20.964	26.268	0.308	0.080	43.104
A4	101.708	27.599	14.583	92.639	29.620	33.389	0.428	0.091	66.342
A5	166.594	19.420	13.951	86.696	32.431	35.301	0.240	0.133	76.464
B1	0.000	9.862	8.337	0.000	17.155	19.229	0.654	0.111	108.614
B2	47.067	8.999	5.899	20.779	13.941	13.913	1.097	0.128	50.216
B3	40.631	13.172	6.862	18.449	15.282	20.305	1.156	0.337	18.604
B4	101.708	28.111	22.705	92.639	36.470	18.094	0.699	0.248	21.748
B5	166.594	25.839	12.642	86.696	15.795	15.019	0.890	0.293	26.734
C1	0.000	23.508	11.583	0.000	44.830	51.801	0.583	0.100	40.681
C2	97.046	16.748	10.892	69.560	21.643	32.432	0.466	0.331	56.057
C3	53.805	13.330	11.403	36.315	23.479	27.704	0.126	0.328	53.639
C4	101.708	42.469	22.301	92.639	40.896	21.995	0.200	0.183	39.935
C5	166.594	24.450	10.500	86.696	34.229	19.872	0.163	0.060	19.213

*: TOMADO DE AÑO 3

RESUMEN		BALANCE GENERAL
ENTRADA	SALIDAS	
30.155	34.244	-4.089
95.877	25.448	70.431
117.939	35.028	82.911
251.556	48.462	203.094
305.141	49.026	256.115
26.757	28.231	-1.474
90.806	21.027	69.779
87.534	26.660	60.874
260.028	41.835	218.193
294.024	26.614	267.410
66.336	64.047	2.289
204.997	44.061	160.936
128.928	39.561	89.367
277.713	44.678	233.035
311.970	30.615	281.355

BALANCE DE NITROGENO (AÑO 3)

TRATAM	MULCH-F	CULTIVO DE FRIJOL		MULCH-M	CULTIVO DE MAIZ		ENTRADA POR LLUVIA = 0.000		
	ENTRADA	ENTRADA	SALIDAS	ENTRADA	ENTRADA	SALIDAS	EROSION	ESCORRIE*	LLUVIA*
A1	0.000	13.095	20.406	0.000	31.603	12.303	0.462	0.026	33.212
A2	15.676	16.043	17.899	20.838	19.557	10.076	1.273	0.114	38.174
A3	23.392	22.553	23.392	23.071	24.165	9.471	0.529	0.035	43.104
A4	100.552	39.579	39.218	104.166	49.526	25.572	0.129	0.046	66.342
A5	82.200	46.478	41.664	83.912	36.801	26.877	0.102	0.046	76.464
B1	0.000	20.566	27.696	0.000	13.917	4.747	0.722	0.031	108.614
B2	22.251	12.362	14.754	25.991	8.103	4.417	1.395	0.106	50.216
B3	18.348	18.066	16.036	22.449	18.458	4.657	1.575	0.374	18.604
B4	100.552	27.466	37.507	104.166	32.718	14.732	0.078	0.047	21.748
B5	82.200	64.642	48.557	83.912	37.351	15.420	0.720	0.078	26.734
C1	0.000	20.032	32.808	0.000	33.419	21.671	1.540	0.059	40.681
C2	59.978	60.145	13.709	55.801	32.982	10.267	0.678	0.066	56.057
C3	45.784	17.517	18.172	35.645	20.674	13.958	2.587	1.299	53.639
C4	100.552	47.831	52.636	104.166	29.247	20.405	0.312	0.033	39.935
C5	82.200	30.712	43.995	83.912	40.049	17.541	0.614	0.027	19.213

RESUMEN		BALANCE GENERAL
ENTRADA	SALIDAS	
44.697	66.439	-21.742
72.314	67.536	4.778
93.181	76.530	16.651
293.825	132.307	161.519
249.391	145.182	104.209
34.483	141.709	-107.226
68.427	70.969	-2.492
75.336	41.245	34.092
254.907	74.112	180.795
296.106	91.510	204.596
53.451	95.660	-42.209
208.906	80.827	128.079
119.619	69.637	50.982
281.799	113.324	168.475
236.873	81.290	155.583

Cuadro 12a Balance anual de fósforo en una rotación frijol - maíz. San Juan Sur, Turrialba (1990 - 1993).

BALANCE DE FOSFORO (AÑO 1)

TRATAM	MULCH-F		CULTIVO DE FRIJOL		MULCH-M		CULTIVO DE MAIZ		ENTRADA POR LLUVIA = 1.500		
	ENTRADA	ENTRADAS	SAIDAS	ENTRADA	ENTRADAS	SAIDAS	ENTRADA	ENTRADAS	EROSION	ESCORRIE*	LIXIVIA*
(S A L I D A S)											
A1	0.000	2.853	2.708	0.000	4.438	6.143	0.900	0.007	1.170		
A2	0.000	1.098	1.717	7.198	2.807	5.428	0.800	0.008	0.789		
A3	0.000	2.628	3.801	8.288	5.083	4.132	0.200	0.007	0.830		
A4	6.594	5.522	6.240	6.594	7.934	9.281	0.100	0.004	0.909		
A5	14.343	2.242	3.113	14.343	4.314	4.820	0.100	0.013	1.108		
B1	0.000	2.782	4.150	0.000	5.738	8.012	0.600	0.003	0.790		
B2	0.000	1.933	2.155	8.427	2.078	2.400	7.800	0.030	0.695		
B3	0.000	2.554	1.952	5.772	3.433	6.578	1.400	0.025	5.848		
B4	6.594	4.102	6.517	6.594	5.730	8.763	0.400	0.005	0.710		
B5	14.343	2.485	3.632	14.343	6.204	4.937	0.100	0.008	0.710		
C1	0.000	2.609	3.578	0.000	5.479	8.702	0.100	0.007	1.022		
C2	0.000	2.468	3.388	12.231	5.417	5.355	0.100	0.011	0.709		
C3	0.000	2.223	2.665	9.309	5.409	6.985	0.100	0.027	0.697		
C4	6.594	4.294	2.981	6.594	9.054	10.482	0.000	0.003	1.027		
C5	14.343	2.321	4.844	14.343	10.253	11.077	0.000	0.003	0.790		

* TOMADOS DE AÑO 3

RESUMEN		BALANCE
ENTRADA	SAIDAS	GENERAL
8.590	10.935	-2.348
12.598	8.639	4.059
17.478	8.770	8.708
28.142	18.494	11.649
36.742	9.253	27.490
10.000	13.555	-3.555
13.938	12.940	0.998
13.258	16.803	-3.545
24.519	18.394	6.125
38.875	9.385	29.490
9.588	13.410	-3.822
21.646	9.590	12.056
18.441	10.475	7.966
28.035	14.373	13.662
42.781	18.714	24.067

BALANCE DE FOSFORO (AÑO 2)

TRATAM	MULCH-F		CULTIVO DE FRIJOL		MULCH-M		CULTIVO DE MAIZ		ENTRADA POR LLUVIA = 1.500		
	ENTRADA	ENTRADAS	SAIDAS	ENTRADA	ENTRADAS	SAIDAS	ENTRADA	ENTRADAS	EROSION	ESCORRIE*	LIXIVIA*
(S A L I D A S)											
A1	0.000	0.964	0.590	0.000	2.371	5.462	0.001	0.009	1.170		
A2	3.497	1.245	1.380	1.358	1.457	3.540	0.001	0.037	0.789		
A3	3.852	1.316	0.910	1.712	2.017	6.516	0.000	0.009	0.630		
A4	5.769	2.137	1.792	4.945	3.019	5.662	0.001	0.007	0.869		
A5	10.187	1.477	1.844	5.878	3.418	7.473	0.001	0.010	1.108		
B1	0.000	0.693	0.945	0.000	1.855	5.163	0.001	0.005	0.790		
B2	3.710	0.730	0.597	1.288	1.357	3.516	0.002	0.011	0.695		
B3	2.901	0.857	0.679	1.461	1.871	5.031	0.002	0.009	5.848		
B4	5.769	2.641	2.525	4.945	4.522	3.193	0.001	0.023	0.710		
B5	10.187	1.978	1.840	5.878	2.158	3.270	0.002	0.009	0.710		
C1	0.000	1.892	1.288	0.000	5.651	11.131	0.002	0.009	1.022		
C2	7.694	1.058	0.904	5.008	2.584	7.484	0.001	0.012	0.709		
C3	4.271	1.008	1.049	2.888	2.549	5.387	0.001	0.005	0.697		
C4	5.769	3.074	2.470	4.945	5.613	3.958	0.001	0.009	1.027		
C5	10.187	1.981	1.364	5.878	4.270	3.974	0.001	0.005	0.790		

* TOMADO DE AÑO 3

RESUMEN		BALANCE
ENTRADA	SAIDA	GENERAL
4.835	8.271	-3.435
9.057	5.727	3.330
10.367	8.065	2.332
17.371	8.531	8.840
22.480	10.433	12.027
4.047	6.904	-2.857
8.583	4.822	3.761
8.599	11.570	-2.981
19.377	6.452	12.925
21.701	5.631	16.070
8.843	13.429	-4.586
17.834	9.110	8.725
12.214	7.138	5.076
20.901	7.463	13.438
23.817	6.154	17.663

BALANCE DE FOSFORO (AÑO 3)

TRATAM	MULCH-F		CULTIVO DE FRIJOL		MULCH-M		CULTIVO DE MAIZ		ENTRADA POR LLUVIA = 1.500		
	ENTRADA	ENTRADAS	SAIDAS	ENTRADA	ENTRADAS	SAIDAS	ENTRADA	ENTRADAS	EROSION	ESCORRIE*	LIXIVIA*
(S A L I D A S)											
A1	0.000	0.917	1.922	0.000	3.333	3.254	0.000	0.007	1.170		
A2	0.979	1.031	1.772	1.344	2.111	2.922	0.002	0.008	0.789		
A3	1.300	1.804	2.191	1.582	2.593	2.798	0.001	0.007	0.830		
A4	5.605	2.695	3.340	6.098	5.344	7.183	0.000	0.004	0.869		
A5	4.084	2.788	3.981	5.517	5.796	6.782	0.000	0.013	1.108		
B1	0.000	1.383	2.633	0.000	1.499	1.077	0.001	0.003	0.790		
B2	1.278	0.758	1.431	1.803	0.870	1.104	0.002	0.030	0.695		
B3	0.963	1.245	1.594	1.240	1.892	1.225	0.003	0.025	5.848		
B4	5.605	1.983	3.987	6.098	3.794	3.623	0.000	0.005	0.710		
B5	4.084	4.074	4.933	5.517	4.884	4.525	0.001	0.008	0.710		
C1	0.000	1.500	3.235	0.000	5.277	7.698	0.004	0.007	1.022		
C2	3.133	4.186	1.619	3.549	4.341	2.320	0.001	0.011	0.709		
C3	2.458	1.218	1.908	2.278	2.730	3.490	0.004	0.027	0.697		
C4	5.605	3.798	5.479	6.098	3.546	8.455	0.001	0.003	1.027		
C5	4.084	2.651	5.687	5.517	5.742	6.472	0.002	0.003	0.790		

RESUMEN		BALANCE
ENTRADAS	SAIDAS	GENERAL
5.751	6.362	-0.612
6.985	5.493	1.472
8.579	5.624	2.955
21.242	11.376	9.866
19.685	11.893	7.822
4.382	4.503	-0.121
6.205	3.252	2.942
6.840	8.095	-1.255
18.980	8.325	10.655
20.000	10.178	9.884
8.277	11.064	-3.087
16.708	4.659	12.049
10.184	8.124	4.080
20.545	12.965	7.580
19.495	12.954	6.542

Cuadro 13a Balance anual de potasio en una rotación frijol - maíz. San Juan Sur, Turrialba (1990 - 1993).

BALANCE DE POTASIO (AÑO 1)

TRAT	MULCH-F		CULTIVO DE FRIJOL		MULCH-M		CULTIVO DE MAIZ		ENTRADA POR LLUVIA = 4.771		
	ENTRADA	ENTRADAS	SALIDAS	ENTRADA	ENTRADAS	SALIDAS	EROSION	ESCORRE*	LDQMA*	(SALIDAS)	
A1	0.000	38.289	21.644	0.000	44.906	21.284	0.070	0.044	22.793		
A2	0.000	9.696	10.894	42.763	23.292	17.954	0.070	0.104	29.976		
A3	0.000	35.810	27.152	99.733	90.419	17.696	0.010	0.042	50.787		
A4	29.671	76.962	48.803	29.671	86.966	35.466	0.009	0.067	38.304		
A5	111.784	31.557	21.332	111.784	50.184	27.382	0.020	0.047	27.253		
B1	0.000	33.907	31.963	0.000	54.417	24.030	0.040	0.043	59.243		
B2	0.000	25.773	15.300	58.346	23.811	10.973	0.500	0.225	10.432		
B3	0.000	22.938	12.040	42.353	26.957	21.251	0.070	0.334	15.506		
B4	29.671	73.763	60.671	29.671	64.837	29.115	0.020	0.039	65.491		
B5	111.784	31.154	34.047	111.784	57.775	21.781	0.010	0.199	47.724		
C1	0.000	36.254	31.308	0.000	75.134	26.418	0.008	0.079	36.953		
C2	0.000	37.106	31.551	122.619	90.716	15.240	0.008	0.147	25.994		
C3	0.000	24.040	22.212	77.571	64.381	22.702	0.006	0.035	15.487		
C4	29.671	70.942	28.608	29.671	110.782	27.727	0.001	0.024	23.307		
C5	111.784	33.597	48.241	111.784	82.578	33.596	0.002	0.057	23.695		

* : TOMADOS DE AÑO 3

RESUMEN		BALANCE
ENTRADA	SALIDAS	GENERAL
88.096	65.716	22.320
90.520	58.898	21.623
170.732	95.658	75.074
228.061	120.649	107.432
310.041	78.034	234.007
93.096	115.355	-22.259
110.700	37.520	73.179
97.020	49.290	47.730
202.713	155.337	47.376
317.228	103.737	213.491
116.158	94.784	21.304
225.214	72.938	152.276
170.764	61.344	109.420
245.837	79.667	166.169
344.473	103.561	240.911

BALANCE DE POTASIO (AÑO 2)

TRATAM	MULCH-F		CULTIVO DE FRIJOL		MULCH-M		CULTIVO DE MAIZ		ENTRADA POR LLUVIA = 4.771		
	ENTRADA	ENTRADAS	SALIDAS	ENTRADA	ENTRADAS	SALIDAS	EROSION	ESCORRE	LDQMA*	(SALIDAS)	
A1	0.000	11.130	3.902	0.000	23.078	20.853	0.010	0.296	22.793		
A2	16.915	12.280	7.973	7.724	15.788	10.484	0.013	0.219	29.976		
A3	22.652	16.737	7.283	15.283	23.810	18.177	0.004	0.158	50.787		
A4	28.351	28.372	12.542	24.561	30.121	19.626	0.007	0.065	38.304		
A5	61.500	31.120	14.258	41.585	30.950	20.099	0.007	0.108	27.253		
B1	0.000	6.795	5.063	0.000	10.932	12.483	0.012	0.140	59.243		
B2	20.716	8.384	4.818	10.296	10.690	11.925	0.018	0.068	10.432		
B3	15.935	9.602	4.282	7.703	17.575	12.758	0.018	0.102	15.506		
B4	28.351	43.511	18.900	24.561	43.052	17.333	0.012	0.208	65.491		
B5	61.500	32.806	12.168	41.585	18.758	10.659	0.019	0.132	47.724		
C1	0.000	28.101	12.311	0.000	64.677	35.961	0.019	0.090	36.953		
C2	52.639	18.220	8.132	45.587	27.707	21.622	0.024	0.232	25.994		
C3	28.538	11.690	7.936	22.814	28.529	17.187	0.011	0.201	15.487		
C4	28.351	42.325	18.772	24.561	51.752	14.718	0.015	0.279	23.307		
C5	61.500	25.902	11.168	41.585	36.667	16.465	0.011	0.276	23.695		

* TOMADO DE AÑO 3

RESUMEN		BALANCE
ENTRADAS	SALIDAS	GENERAL
38.979	47.854	-8.875
57.479	48.605	8.814
83.434	74.389	9.045
114.176	70.574	43.602
189.912	61.724	128.188
22.499	78.921	-54.423
60.853	27.081	33.771
55.587	32.730	22.851
144.245	101.044	42.301
157.400	70.702	86.698
97.549	85.334	12.215
148.995	58.004	92.991
98.343	40.922	55.521
151.780	57.088	94.671
170.405	51.615	118.791

BALANCE DE POTASIO (AÑO 3)

TRATAM	MULCH-F		CULTIVO DE FRIJOL		MULCH-M		CULTIVO DE MAIZ		ENTRADA POR LLUVIA = 4.771		
	ENTRADA	ENTRADAS	SALIDAS	ENTRADA	ENTRADAS	SALIDAS	EROSION	ESCORRE	LDQMAC	(SALIDAS)	
A1	0.000	12.838	10.573	0.000	22.372	7.931	0.004	0.044	22.793		
A2	8.308	13.479	8.920	10.113	17.588	9.199	0.018	0.104	29.976		
A3	9.882	20.598	11.802	13.680	21.862	7.576	0.004	0.042	50.787		
A4	37.584	28.741	18.310	27.190	48.548	19.409	0.002	0.087	38.304		
A5	15.572	35.432	21.963	30.353	39.806	23.109	0.002	0.047	27.253		
B1	0.000	14.590	13.848	0.000	10.198	3.391	0.010	0.043	59.243		
B2	9.490	9.038	6.908	13.480	5.165	3.541	0.018	0.225	10.432		
B3	6.351	14.895	7.535	10.209	15.146	3.676	0.021	0.334	15.506		
B4	37.584	25.200	21.183	27.190	23.428	10.506	0.001	0.039	65.491		
B5	15.572	64.974	29.751	30.353	37.962	12.738	0.013	0.198	47.724		
C1	0.000	16.347	19.638	0.000	32.580	14.390	0.037	0.079	36.953		
C2	29.141	49.646	8.347	38.744	48.372	8.270	0.022	0.147	25.994		
C3	18.215	10.559	9.937	18.636	18.738	10.908	0.080	0.035	15.487		
C4	37.584	51.614	31.504	27.190	31.212	15.200	0.007	0.024	23.307		
C5	15.572	38.033	29.323	30.353	58.821	14.646	0.025	0.057	23.695		

RESUMEN		BALANCE
ENTRADAS	SALIDAS	GENERAL
39.081	41.345	-1.263
52.258	48.186	4.070
70.571	70.192	0.379
144.833	78.003	66.740
125.935	72.405	53.530
29.547	76.535	-46.988
42.942	21.124	21.818
51.372	27.162	24.210
118.173	97.221	20.952
153.652	90.422	63.231
53.698	71.088	-17.390
170.673	42.779	127.896
71.918	37.027	34.892
152.370	70.043	82.327
147.550	67.746	79.804

Cuadro 14a Balance anual de calcio en una rotación frijol - maíz. San Juan Sur, Turrialba (1990 - 1993).

BALANCE DE CALCIO (AÑO 1)

TRAT	MULCH-F		CULTIVO DE FRIJOL		MULCH-M		CULTIVO DE MAIZ		ENTRADA POR LLUVIA = 10.906		
	ENTRADA	ENTRADAS	ENTRADAS	SALIDAS	ENTRADA	ENTRADAS	ENTRADAS	SALIDAS	EROSION	ESCORRE*	LIXVIA*
A1	0.000	20.363	5.511	0.000	18.713	0.945	0.960	0.066	0.066	157.193	
A2	0.000	13.330	4.622	23.350	11.277	1.050	0.730	0.073	177.093		
A3	0.000	24.599	8.010	24.028	20.301	1.322	0.070	0.046	111.787		
A4	29.506	81.360	11.506	29.506	25.130	1.969	0.140	0.047	185.204		
A5	75.062	18.438	5.990	75.062	12.275	2.139	0.120	0.029	268.189		
B1	0.000	35.610	10.378	0.000	21.234	1.145	0.560	0.049	362.173		
B2	0.000	22.370	4.540	26.479	10.472	0.757	8.400	0.337	152.618		
B3	0.000	26.739	4.100	18.718	14.429	1.518	0.630	0.334	127.885		
B4	29.506	35.458	13.483	29.506	22.227	1.698	0.440	0.032	202.391		
B5	75.062	31.671	10.138	75.062	15.438	1.483	0.130	0.050	120.295		
C1	0.000	30.901	10.734	0.000	15.651	1.243	0.080	0.066	137.199		
C2	0.000	22.993	8.027	38.187	18.021	1.098	0.110	0.057	134.301		
C3	0.000	26.044	6.981	34.701	15.410	0.748	0.060	0.729	188.552		
C4	29.506	46.586	8.843	29.506	25.291	1.353	0.007	0.027	144.585		
C5	75.062	31.957	25.763	75.062	22.540	1.007	0.030	0.028	100.308		

* TOMADOS DE AÑO 3

RESUMEN		BALANCE
ENTRADA	SALIDAS	GENERAL
49.973	184.876	-114.703
58.862	183.568	-124.706
78.914	121.216	-41.301
158.407	198.886	-42.478
191.743	270.474	-84.731
67.749	374.303	-306.554
70.227	167.653	-97.425
70.792	134.487	-63.675
127.603	215.042	-90.439
208.136	132.078	76.058
57.459	149.323	-91.864
88.107	144.493	-56.387
67.062	197.060	-130.000
141.795	154.814	-13.020
215.526	127.137	88.390

BALANCE DE CALCIO (AÑO 2)

TRATAM	MULCH-F		CULTIVO DE FRIJOL		MULCH-M		CULTIVO DE MAIZ		ENTRADA POR LLUVIA = 10.906		
	ENTRADAS	ENTRADAS	ENTRADAS	SALIDAS	ENTRADAS	ENTRADAS	ENTRADAS	SALIDAS	EROSION	ESCORRE*	LIXVIA*
A1	0.000	5.409	1.134	0.000	4.844	0.787	0.073	0.311	157.193		
A2	13.315	18.280	3.471	5.952	4.746	0.545	0.064	0.152	177.093		
A3	11.776	18.107	2.860	0.520	7.277	1.123	0.012	0.230	111.787		
A4	22.913	17.039	2.986	1.319	10.172	1.784	0.059	0.136	185.204		
A5	47.588	18.227	3.196	11.787	12.075	1.288	0.048	0.101	268.189		
B1	0.000	9.299	2.025	0.000	6.073	1.088	0.086	0.165	362.173		
B2	13.363	7.493	1.868	6.043	5.351	0.459	0.202	0.309	152.618		
B3	10.227	13.540	1.967	6.544	7.787	1.258	0.126	0.292	127.885		
B4	22.913	24.892	3.318	1.319	10.698	1.004	0.125	0.298	202.391		
B5	47.588	19.854	3.107	11.787	4.744	0.242	0.226	0.183	120.295		
C1	0.000	20.360	3.682	0.000	12.043	1.284	0.090	0.158	137.199		
C2	24.666	12.499	2.484	20.049	7.000	1.100	0.128	0.281	134.301		
C3	14.444	13.290	2.554	13.459	6.293	2.052	0.028	0.132	188.552		
C4	22.913	33.759	3.670	1.319	11.043	0.791	0.078	0.178	144.585		
C5	47.588	18.479	2.964	11.787	11.430	0.568	0.022	0.138	100.308		

* TOMADO DE AÑO 3

RESUMEN		BALANCE
ENTRADA	SALIDAS	GENERAL
21.159	159.498	-138.339
51.200	181.325	-130.125
54.598	115.981	-61.383
82.349	190.170	-107.821
109.543	272.823	-163.280
29.278	365.618	-336.340
43.156	155.456	-112.299
49.003	131.498	-82.495
70.727	207.198	-136.471
94.830	124.053	-29.223
44.209	142.421	-98.212
75.120	138.292	-63.172
58.362	193.318	-134.956
79.940	149.300	-69.360
100.150	103.690	37.000

BALANCE DE CALCIO (AÑO 3)

TRATAM	MULCH-F		CULTIVO DE FRIJOL		MULCH-M		CULTIVO DE MAIZ		ENTRADA POR LLUVIA = 10.906		
	ENTRADA	ENTRADAS	ENTRADAS	SALIDAS	ENTRADA	ENTRADAS	ENTRADAS	SALIDAS	EROSION	ESCORRE*	LIXVIA*
A1	0.000	6.854	1.986	0.000	12.846	0.508	0.037	0.066	157.193		
A2	6.521	13.034	2.304	4.988	7.411	0.504	0.103	0.073	177.093		
A3	7.097	18.661	2.473	4.703	7.904	0.541	0.020	0.046	111.787		
A4	19.451	28.307	5.691	37.934	21.348	1.396	0.015	0.047	185.204		
A5	44.674	42.442	6.054	35.057	19.938	1.507	0.014	0.029	268.189		
B1	0.000	20.532	3.008	0.000	4.708	0.319	0.062	0.049	362.173		
B2	7.985	9.549	1.875	5.790	3.901	0.305	0.182	0.337	152.618		
B3	6.736	12.847	2.077	4.797	7.288	0.245	0.116	0.334	127.885		
B4	19.451	19.657	4.486	37.934	9.789	0.362	0.008	0.032	202.391		
B5	44.674	55.740	6.320	35.057	13.908	0.335	0.091	0.050	120.295		
C1	0.000	15.127	4.667	0.000	16.320	2.633	0.179	0.086	137.199		
C2	15.053	42.594	2.580	11.609	13.335	0.403	0.134	0.057	134.301		
C3	17.635	18.777	2.995	13.178	8.793	1.258	0.284	0.729	188.552		
C4	19.451	50.058	7.532	37.934	12.003	0.833	0.024	0.027	144.585		
C5	44.674	33.042	8.175	35.057	14.219	0.511	0.072	0.028	100.308		

RESUMEN		BALANCE
ENTRADA	SALIDA	GENERAL
30.606	159.801	-129.195
42.837	180.077	-137.239
47.281	114.848	-67.567
117.944	192.344	-74.400
163.017	274.794	-111.777
36.146	366.231	-330.085
38.021	155.297	-117.276
42.673	130.667	-88.004
97.737	207.280	-109.543
160.291	127.091	33.200
42.354	145.044	-102.690
93.486	137.478	-43.990
88.289	193.818	-105.528
130.349	153.100	-22.751
137.899	169.094	-31.195

Cuadro 15a Balance anual de magnesio en una rotación frijol - maíz. San Juan Sur, Turrialba (1990 - 1993).

BALANCE DE MAGNESIO (AÑO 1)

TRATAM	MULCH-F		CULTIVO DE FRIJOL		MULCH-M		CULTIVO DE MAIZ		ENTRADA POR LLUVIA = 4.000			RESUMEN	BALANCE	
	ENTRADA	ENTRADAS	SALIDAS	ENTRADA	ENTRADAS	SALIDAS	ENTRADA	ENTRADAS	EROSION	ESCORRE*	LIXIVA*			ENTRADA
A1	0.000	5.408	3.307	0.000	8.813	3.071	0.060	0.017	9.432			16.311	15.876	0.434
A2	0.000	1.066	1.321	7.779	2.778	2.275	0.030	0.020	10.649			15.731	14.206	1.436
A3	0.000	5.669	4.480	8.708	6.034	2.314	0.008	0.016	11.019			24.631	17.836	6.696
A4	7.911	10.274	5.650	7.911	8.959	4.972	0.008	0.017	13.428			30.146	24.274	14.871
A5	21.350	3.968	3.459	21.350	5.949	3.209	0.009	0.009	22.909			56.727	29.596	27.132
B1	0.000	5.631	5.361	0.000	8.677	4.000	0.020	0.016	27.647			18.398	37.050	-18.652
B2	0.000	2.234	1.770	9.821	2.106	1.230	0.400	0.112	11.591			18.250	15.103	3.147
B3	0.000	2.102	1.237	4.978	2.919	3.542	0.040	0.094	11.697			14.068	16.609	-2.520
B4	7.911	7.673	8.090	7.911	7.088	4.240	0.010	0.011	19.728			34.674	32.077	2.597
B5	21.350	2.867	3.632	21.350	5.152	2.560	0.008	0.011	9.860			64.800	16.071	38.729
C1	0.000	5.530	4.771	0.000	7.853	4.351	0.004	0.021	29.484			17.472	38.631	-21.159
C2	0.000	6.540	4.925	15.837	5.858	2.909	0.003	0.021	19.298			32.324	26.856	5.468
C3	0.000	7.014	3.808	13.462	7.440	3.243	0.003	0.240	25.940			32.036	33.235	-1.198
C4	7.911	10.786	4.161	7.911	14.732	8.088	0.000	0.009	13.431			45.410	23.688	21.722
C6	21.350	6.226	6.606	21.350	11.678	5.036	0.001	0.010	15.402			64.666	27.053	37.614

* TOMADOS DE AÑO 3

BALANCE DE MAGNESIO (AÑO 2)

TRATAM	MULCH-F		CULTIVO DE FRIJOL		MULCH-M		CULTIVO DE MAIZ		ENTRADA POR LLUVIA = 4.000			RESUMEN	BALANCE	
	ENTRADA	ENTRADAS	SALIDAS	ENTRADA	ENTRADAS	SALIDAS	EROSION	ESCORRE	LIXIVA*	ENTRADA	SALIDA			GENERAL
A1	0.000	1.784	0.544	0.000	1.990	2.754	0.006	0.044	9.432			7.646	12.781	-4.936
A2	2.577	0.777	0.750	1.691	1.041	1.634	0.008	0.024	10.649			10.178	13.068	-2.890
A3	2.702	1.928	0.950	1.743	2.321	3.146	0.002	0.029	11.019			12.674	15.145	-2.271
A4	4.780	2.273	1.394	3.628	3.883	2.804	0.004	0.018	13.428			18.652	17.648	1.008
A5	12.802	2.018	1.352	7.447	4.478	3.885	0.006	0.011	22.909			30.835	26.141	2.694
B1	0.000	1.232	0.743	0.000	1.990	2.671	0.007	0.017	27.647			7.292	31.084	-23.792
B2	2.761	0.690	0.467	1.527	1.627	1.682	0.011	0.022	11.591			10.701	13.773	-3.072
B3	2.035	0.673	0.422	1.299	1.354	2.156	0.013	0.023	11.697			9.450	14.311	-4.861
B4	4.780	2.968	1.587	3.628	5.187	1.977	0.007	0.039	19.728			20.851	23.336	-2.684
B5	12.802	1.529	1.036	7.447	1.871	1.575	0.014	0.020	9.860			27.740	12.505	15.234
C1	0.000	2.230	1.381	0.000	6.359	5.565	0.018	0.011	29.484			12.679	36.458	-23.779
C2	8.146	1.880	1.150	8.790	3.334	4.712	0.015	0.029	19.298			24.241	25.206	-0.964
C3	5.222	2.421	1.095	4.008	3.571	2.822	0.006	0.017	25.940			19.313	20.890	-10.587
C4	4.780	7.441	2.309	3.628	5.651	2.057	0.013	0.023	13.431			25.488	17.924	7.564
C5	12.802	2.128	1.241	7.447	3.888	1.703	0.004	0.017	15.402			30.354	18.367	11.987

* TOMADO DE AÑO 3

BALANCE DE MAGNESIO (AÑO 3)

TRATAM	MULCH-F		CULTIVO DE FRIJOL		MULCH-M		CULTIVO DE MAIZ		ENTRADA POR LLUVIA = 4.000			RESUMEN	BALANCE	
	ENTRADA	ENTRADAS	SALIDAS	ENTRADA	ENTRADAS	SALIDAS	EROSION	ESCORRE	LIXIVA	ENTRADA	SALIDA			GENERAL
A1	0.000	2.508	1.405	0.000	3.423	1.627	0.002	0.017	9.432			10.022	12.482	-2.460
A2	1.155	0.951	0.945	1.184	1.477	1.411	0.009	0.020	10.649			8.837	13.034	-4.197
A3	1.313	2.057	1.343	1.119	2.367	1.443	0.001	0.015	11.019			10.947	13.822	-2.875
A4	4.945	4.104	2.474	6.098	5.358	3.697	0.001	0.017	13.428			24.594	19.618	4.978
A5	9.190	4.280	2.595	7.408	6.883	3.788	0.002	0.009	22.909			31.651	29.283	2.568
B1	0.000	2.295	1.755	0.000	1.335	0.519	0.004	0.016	27.647			7.720	29.941	-22.221
B2	1.094	1.333	0.888	1.282	0.762	0.571	0.007	0.112	11.591			8.562	13.170	-4.608
B3	0.919	0.845	0.821	1.058	1.515	0.572	0.007	0.094	11.697			8.425	13.190	-4.768
B4	4.945	2.096	2.462	6.098	2.783	1.811	0.000	0.011	19.728			18.983	24.041	-4.058
B5	9.190	4.145	3.083	7.408	4.242	2.179	0.007	0.011	9.860			29.078	15.140	13.938
C1	0.000	1.346	2.310	0.000	6.098	4.458	0.023	0.021	29.484			11.535	36.204	-24.790
C2	4.680	5.858	1.184	3.799	5.933	1.311	0.017	0.021	19.298			24.300	21.811	2.550
C3	4.607	2.673	1.497	3.519	3.830	1.954	0.027	0.240	25.940			18.720	29.660	-10.940
C4	4.945	7.673	4.305	6.098	3.593	3.331	0.004	0.009	13.431			28.399	21.081	5.318
C5	9.190	4.184	3.732	7.408	5.804	2.725	0.013	0.010	15.402			30.676	21.881	8.795

Cuadro 16a. Pérdidas de suelo (t/ha) por año y por ciclo de cultivo (frijol, maíz). San Juan Sur (1993).

TRAT	FRIJOL		MAIZ		Total (año)	
	g/parc	kg/ha	g/parc	kg/ha	g/parc	kg/ha
A1	3.11	0.71	203.78	46.31	223.26	50.74
A2	15.20	3.45	709.36	161.22	767.03	174.33
A3	9.01	2.05	211.42	48.05	230.55	52.40
A4	10.66	2.42	45.43	10.33	73.58	16.72
A5	5.86	1.33	57.30	13.02	81.35	18.49
A6	152.15	34.58	35703.61	8114.46	36210.98	8229.77
B1	2.52	0.57	470.95	107.04	489.01	111.14
B2	18.96	4.31	947.38	215.31	1076.77	244.72
B3	10.63	2.42	983.26	223.47	1082.69	246.07
B4	1.69	0.39	39.36	8.94	48.42	11.00
B5	49.86	11.33	318.75	72.44	519.40	118.05
B6	166.76	37.90	12205.76	2774.04	12861.90	2923.16
C1	62.56	14.22	993.16	225.72	1164.17	264.58
C2	76.49	17.38	462.06	105.01	609.04	138.42
C3	106.30	24.16	2848.86	647.47	3053.00	693.86
C4	12.13	2.76	201.15	45.72	280.01	63.64
C5	14.64	3.33	476.69	108.34	519.53	118.07
C6	83.77	19.04	85697.82	19476.78	85898.76	19522.44

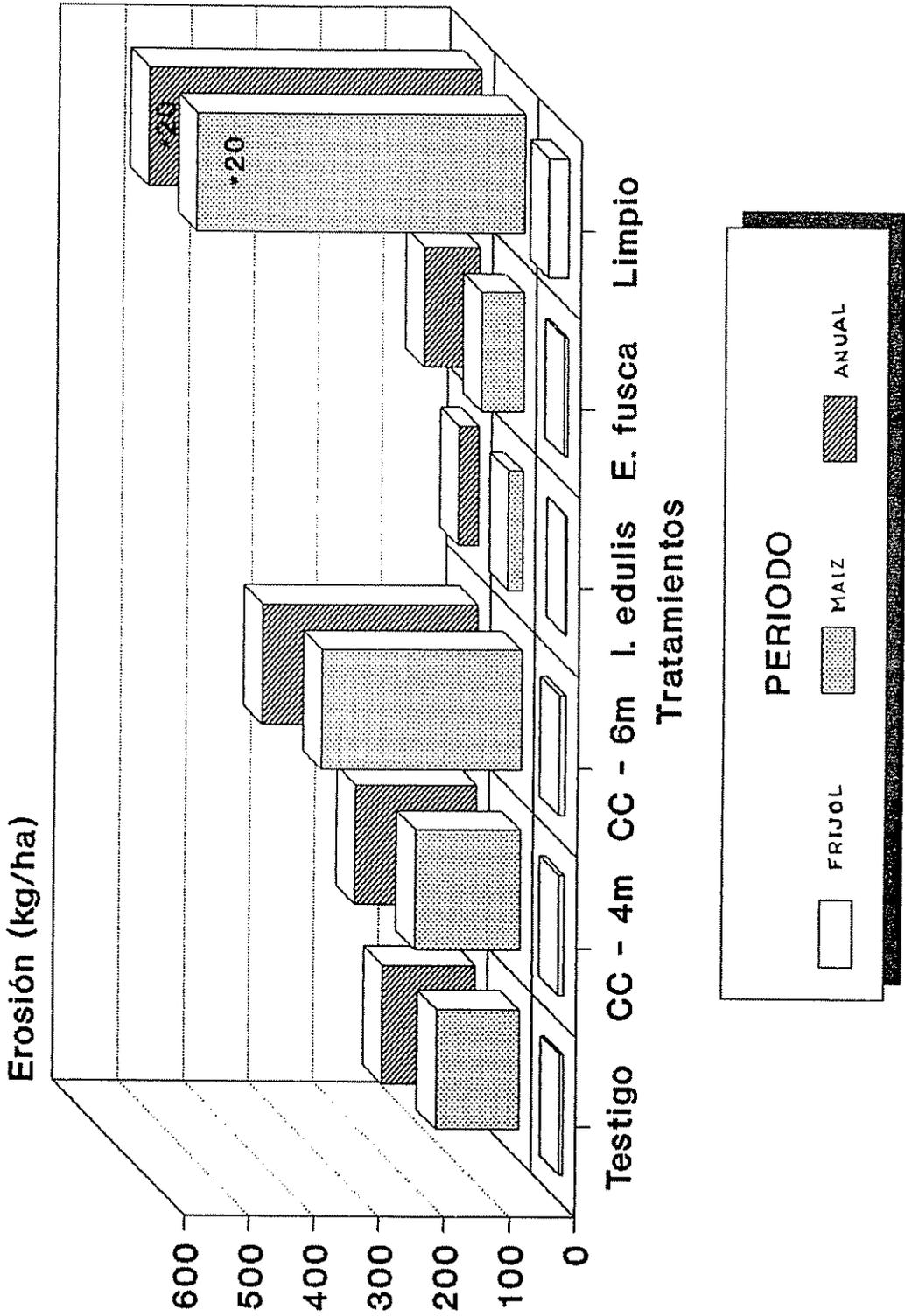


Fig 6a Masa de suelo erosionado (kg/ha). San Juan Sur, Turrialba (1993)