

CENTRO AGRONÓMICO TROPICAL DE INVESTIGACIÓN Y ENSEÑANZA.

SUBDIRECCIÓN GENERAL ADJUNTA DE ENSEÑANZA.

PROGRAMA DE MAESTRÍA.

Metodología de fraccionamiento de fósforo del suelo, en un sistema de cultivo en callejones. 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 Trópicos de Investigación y Enseñanza para optar el grado de

MAGISTER SCIENTIAE

por

AMELIA MARIA PANIAGUA VASQUEZ.

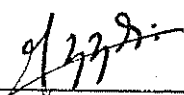
Turrialba, Costa Rica.

1992

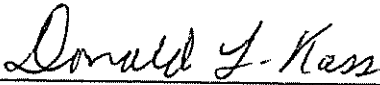
Esta tesis ha sido aceptada, en su presente forma, por la Coordinación del Programa de Estudios de Posgrado en Ciencias Agrícolas y Recursos Naturales Renovables del CATIE y aprobada por el Comité Asesor del estudiante como requisito parcial para optar al grado de:

MAGISTER SCIENTIAE

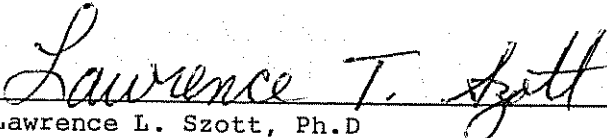
COMITE ASESOR:




María Julia Mazzarino, Dra.
Profesor Consejero



Donald D. Kass, Ph.D
Miembro del Comité




Lawrence L. Szott, Ph.D
Miembro del Comité



Roberto Díaz Romeu, Ms.C
Miembro del Comité

Ramón Lastra Rodríguez, Ph.D
Coordinador Programa de Estudios de Posgrado



Amelia María Paniagua Vásquez
Candidato

DEDICATORIA

A mis Jesús Gerardo;

a María Julia

AGRADECIMIENTO

A la Dra. María Julia Mazzarino, Profesora consejera; por su esfuerzo, apoyo y dedicación en la ejecución de esta investigación; pero sobre todo, por permitir hacer mio éste su trabajo.

Al señor Carlos Fernández, técnico del laboratorio de suelos del CATIE, por su linda amistad y desinteresada ayuda, en la ejecución del trabajo de laboratorio.

Al Msc. Roberto Díaz-Romeu, Jefe del Laboratorio de Suelos, por el apoyo que siempre me ha brindado.

A la Dra. Leslie Cooperband; por sus consejos y ayuda en la modificación del método.

A los miembros del Comité Asesor, Dres. D. Kass; por facilitarme la oportunidad de este trabajo y Lawrence Szott, por su ayuda y oportunas observaciones de este documento.

A Patricia Leandro, química; Mario Jiménez y Gustavo Ortiz técnicos del laboratorio de Suelos, por su apoyo y amistad.

A Yael's Camacho Msc., por su gran colaboración en la presentación de esta tesis.

Al proyecto AFN-SAREC; AFN-CIID, por el financiamiento de esta tesis.

A mi familia; por su amor y comprensión; sobre todo porque nunca me han dado la espalda.

A mis buenos amigos; Luis Cantillo, Patricia Jiménez, Ana I. Mora, Lilliana Hernández, Anabelly Rodríguez, Edgar Vargas, Arturo Ling, por ser ellos mismos.

A mis vecinos Manuel Márquez, y su linda familia; porque con su compañía fue más fácil la estadia en CATIE.

A todos los compañeros de la promoción 89-91; por los buenos ratos compartidos en estos largos dos años.

A todos y cada uno;

MUCHAS GRACIAS

BIOGRAFIA

La autora nació en Grecia, Costa Rica el 6 de octubre de 1959. Realizó sus estudios secundarios en la misma ciudad.

En 1983 recibió el título de Ingeniero en Agronomía, en el Instituto Tecnológico de Costa Rica.

Durante 2 años laboró para la Junta de Defensa del Tabaco, en Puriscal.

Desde 1984 laboró para la Dirección de Investigación y Extensión de la Caña de Azúcar (DIECA), como jefe de laboratorios de suelos.

En 1989 inició sus estudios de Maestría en el Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE), obteniendo el grado de Magister Scientiae el 21 de enero de 1992.

TABLA DE CONTENIDO

Resumen..... IX

Summary..... XI

Lista de Cuadros..... XII

Lista de Figuras..... XIV

1. Introducción..... 1

2. Revisión de Literatura..... 6

 2.1. Breve reseña sobre cultivo en callejones 6

 2.1.1. Efectos benéficos de los árboles 8

 2.1.2. Contribución de los cultivos en callejones a la fertilidad de los suelos..... 11

 2.2. Retención en fósforo en suelos trópicos..... 15

 2.3. Evaluación del contenido de fósforo en suelos trópicos..... 18

 2.3.1. Evaluación de la retención de fósforo..... 18

 2.3.2. Evaluación de la disponibilidad de fósforo..... 20

 2.3.2.1. Fósforo inorgánico..... 20

 2.3.2.2. Fósforo orgánico..... 24

 2.3.2.3. Fósforo microbiano..... 26

 2.3.2.4. Extracciones secuenciales de fósforo..... 28

3. Materiales y Métodos..... 35

 3.1. Ubicación..... 35

 3.2. Muestreo..... 39

 3.3. Metodología..... 40

 3.3.1. Fraccionamiento de P..... 40

 3.3.2. Determinación de P total 45

3.3.3. Determinación de rendimiento de maíz.....	45
3.4. Análisis estadístico.....	46
4. Resultados	47
4.1. Tendencias generales.....	47
4.1.1. Comparación de totales entre fechas y tratamientos.....	47
4.1.2. Efecto de tratamientos.....	50
4.1.2.1. Análisis de factores.....	57
4.1.3. Efecto del tiempo.....	59
4.1.3.1. Total de todas las fracciones	59
4.1.4. Rendimiento de maíz en los tratamientos.....	62
4.1.5. Fósforo microbial.....	64
4.2. Fraccionamiento de P en suelos de diferente pedogénesis.....	64
5. Discusión	68
5.1. Comparación entre totales.....	68
5.1.2. Efecto de tratamientos.....	69
5.1.3. Efecto de rendimiento.....	73
5.2. Efecto del tiempo.....	74
5.3. Fraccionamiento de P en suelos de diferente pedogénesis.....	76
6. Conclusiones	80
7. Recomendaciones	82
8. Bibliografía	83

RESUMEN

PANIAGUA, A. Evaluación de un método de fraccionamiento secuencial de P en suelos en un sistema de cultivo en callejones. Tesis Mag. Sc., Turrialba, C.R. Programa de estudios de Posgrado en Ciencias Agrícolas y Recursos Naturales, CATIE. 83 p.

Se estudio la metodología de fraccionamiento de P en suelos en un sistema de cultivo en callejones; instalado en 1982, en la finca experimental La Montaña, CATIE, (Costa Rica). También se aplicó la metodología a tres suelos de diferente pedogénesis.

En el experimento de cultivo en callejones fueron seleccionadas las parcelas que no han recibido fertilización nitrógenada, y en las cuales se aplican adiciones orgánicas a los cultivos anuales, que para fines de nuestra investigación fue maíz. (*Zea mays*. L. c.v. Tuxpeño C-7); a razón de 20 t ha⁻¹ de materia fresca. Todas estas parcelas reciben por ciclo de cultivo 88 kg ha⁻¹ de P₂O₅ y 130 Kg ha⁻¹ de K₂O; también se seleccionó una parcela sin adición orgánica (control), otra que nunca ha recibido fertilización inorgánica (extra).

Para los tres suelos fueron seleccionadas parcelas sin adiciones de nitrógeno, pero que han recibido fósforo. Los suelos utilizados fueron: un Inceptisol, un Mollisol y un Andosol. Todas las muestras se tomaron a una profundidad de 0-20 cm.

Los resultados del fraccionamiento en el cultivo en callejones indica que el extractante NaOH, representa un porcentaje muy alto del P total, debido principalmente a la cantidad de Fe y Al activo presente en los suelos de La Montaña; esta fracción es considerada como moderadamente lábil. La fracción P resina y P-NaHCO₃, consideradas como las más lábiles, son las que se encontraron en menor proporción. Los valores más altos de P resina y de P orgánico se encontraron en las parcelas fertilizadas independientemente de la aplicación de residuos orgánicos.

Aplicar residuos orgánicos sin fertilización fósforica produce un aumento en las formas inorgánicas moderadamente lábiles (P-NaOH). Dentro de las parcelas de residuos orgánicos más fertilización inorgánica, la mayor cantidad de P lábil se encontró en callejones de *Gliricidia* y la menor cantidad en callejones de *Erythrina*. Los valores bajos en estas parcelas se atribuyen a un secuestro de P por los troncos de los árboles o a un problema de metodología; ya que en general se obtuvieron valores bajos de recuperación en los tratamientos de *Erythrina*. Al agrupar las fracciones en factores, según el modelo del ciclo del P de (Tiessen et al., 1984), se observó que hay una relación

inversa entre P_i lábil y P_o extraído con NaHCO_3 . El aumento en la razón P_i/P_o , indica que en presencia de fertilizante inorgánico fue debido a un estímulo de la mineralización de P de los residuos orgánicos.

No hubo diferencias entre tratamientos, en el rendimiento del maíz. Probablemente otros nutrimentos limitantes, estén enmascarando el efecto de los residuos orgánicos, sin embargo los datos sugieren que con adiciones orgánicas no es necesario fertilización fósforica inorgánica para alcanzar rendimientos satisfactorios.

Los resultados del fraccionamiento en los tres suelos de diferente pedogénesis indican que éstos se originaron de diferentes materiales parentales. Los valores más altos de la fracción más lábil se encontró en el Mollisol. Las fracciones más lábiles se distribuyen así: Mollisol < Inceptisol < Andosol. Entre Inceptisol y Andosol, los datos sugieren que éste último es más viejo, por el contenido de P_o .

SUMMARY

FANIAGUA, V. A. 1991. Procedure fractionation sequential phosphorus in an alley cropping system. Thesis Mag. Sc., Turrialba, C.R. Programa de estudios de Posgrado en Ciencias Agrícolas y Recursos Naturales, CATIE. 83p.

The Hedley sequential phosphorus fractionation procedure was used to study P dynamics in an alley cropping system installed in 1982 on a typic Humitropept at the La Montana experimental farm, CATIE (Turrialba, Costa Rica), and in three soils differing in pedogenesis.

Soil was analyzed from the following alley cropping treatments: mulch of *Erythrina*, non-fertilized; no organic additions, fertilized; mulched (*Erythrina*) and fertilized; alley cropping with *Gliricidia sepium* and fertilization; and alley cropping with *Erythrina poeppigiana* and fertilization. Treatments with organic additions received approximately 20 t fresh material $\text{ha}^{-1} \text{y}^{-1}$. Fertilizer additions included 88 kg $\text{P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$ and 130 kg $\text{K}_2\text{O} \text{ ha}^{-1}$; N was not applied. All plots were cropped with an annual rotation of maize (*Zea mays* L. c.v. Tuxpeño C-7) and beans (*Phaseolus vulgaris*).

In the pedogenesis study, three soils were used: an Inceptisol, a Mollisol, and Andosol. None had been fertilized with N, but all had received P. Samples were taken to a depth of 20 cm.

In the alley cropping study, NaOH extracted a high percentage of total P, probably due to the high levels of Al and Fe compounds, active in P complexation, which are present in this soil. This fraction is considered to be moderately labile. The resin-P and NaHCO_3 fractions, considered the most labile, were smaller than the NaOH fraction. The highest values of resin-P and organic P were found in the soils fertilized with P, independent of the application of organic residues.

The application of organic residues in the absence of P fertilization resulted in an increase in the moderately labile inorganic forms of P (NaOH-P). In soils receiving organic residues and fertilizers, the labile P fraction was greatest in the *Gliricidia* alley cropping treatment and least in the *Erythrina* alley cropping treatment. The low values of labile P in the latter were attributed to the immobilization of P in the *Erythrina* trunks or to a problem in methodology, since in this treatment total P calculated by summing the P fractions was less than total P measured by an independent method.

Upon grouping the P fractions in factors relevant to models of P cycling (Tiessen et al., 1984), an inverse relation between labile P_i and NaHCO_3 -extractable P_o was observed. The ratio of P_i/P_o increased in the absence of

fertilization, probably due to the stimulation of mineralization of P from organics forms.

There were no differences in maize yield among treatments during this study, perhaps due to limitations of other nutrients.

Nevertheless, the data suggest that organic additions obviated the need for inorganic P fertilization in order to obtain satisfactory yields.

The results of the fractionation in the three soils differing in pedogenesis indicated that the soils differed greatly in total P content and the proportion of total P present in the various fractions. Values for the labile fraction were greatest in the Mollisol. The recalcitrant P fractions increased in the order: Mollisol < Inceptisol < Andosol. The Andosol had a greater content and a greater proportion of total P as NaOH extractable P_o and residual P, suggesting that this soil is older than the Inceptisol.

LISTA DE CUADROS

Cuadro No.	Título	Página
1.	Extractantes más comunes utilizados para determinar P disponible en suelos..	24
2.	Características de fertilidad de los suelos de La Montaña, Nicaragua, y San Juan Sur. Análisis realizados en Laboratorio de Suelos de CATIE. 1991.	39
3.	Fósforo extraído en mg kg^{-1} en las fracciones según tratamientos.	48
4.	Absorción total de P, reciclaje de P agregado en los tratamientos (Kg de P ha^{-1}). Calculado de Sánchez, 1989; Hagggar, 1990. .	49
5.	Fósforo extraído según la suma de fracciones, P total por determinación directa y % de recuperación de las fracciones respecto al P total, en 5 tratamientos en La Montaña.	50
6.	Fracciones de P en mg kg^{-1} de suelo agrupadas de acuerdo a su disponibilidad para las plantas, según los tratamientos.	52
7.	Fracciones de P en mg kg^{-1} de suelo agrupadas de acuerdo a su disponibilidad para las plantas (según Szott)	53
8.	Contrastes ortogonales para cada fracción entre 1) parcelas sin fertilización 2) parcela fertilizada sin adiciones orgánicas vs parcelas fertilizadas con adiciones orgánicas 3) callejones de <i>Erythrina</i> vs callejones de <i>Gliricidia</i> .	55
9.	Análisis de factores de las fracciones para todas las fechas y tratamientos.	57
10.	Fracciones de P en mg Kg^{-1} del suelo, según tratamientos y fechas.	60

11.	Fracciones de P en mg kg ⁻¹ agrupadas de acuerdo a su disponibilidad para las plantas y su respectivo % de acuerdo al total, según las fechas.	62
12.	Fracciones de P en mg kg ⁻¹ de suelo, agrupadas de acuerdo a su disponibilidad para las plantas según los tratamientos y las fechas.	63
13.	Rendimientos del cultivo del maíz y biomasa total en los tratamientos estudiados en el experimento de la Montaña.	65
14.	Biomasa total de maíz en todos los tratamientos de La Montaña, incluyendo parcelas fertilizadas con nitrógeno.	65
15.	Fósforo determinado con la extracción secuencial en muestras de suelo de diferente capacidad de retención.	68
16.	Formas agrupadas de P en tres suelos diferentes de acuerdo a su disponibilidad para las plantas, usando el modelo teórico propuesto.	69

LISTA DE FIGURAS

Figura No.	Título	Página
1.	Componentes orgánicos e inorgánicos del ciclo del P en el suelo, extractante químico individual (Tiessen, et al., 1984).	32
2.	Isotermas de sorción de P en suelos de diferente pedogénesis: Inceptisol, Mollisol, Andisol.	38
3.	Procedimiento de fraccionamiento secuencial de P, modificado.	42
4.	Fracciones de P inorgánico y orgánico en los tratamientos analizados. Los datos son promedios de 3 fechas de muestreo y 3 repeticiones.	51

I. INTRODUCCION:

Diversos estudios con sistemas agroforestales han demostrado pocos cambios en los nutrimentos del suelo, a pesar de obtenerse rendimientos sostenibles en el tiempo (Kang, 1985; Lal, 1989). Así, por ejemplo, después de 6 años de estudios con cultivos en callejones en el campo experimental "La Montaña" (CATIE, Costa Rica), encontraron aumentos en fertilidad del suelo solo en el caso del potasio (Kass et al., 1989).

Aunque los nutrimentos puedan limitar el crecimiento de las plantas en los ecosistemas terrestres, la disponibilidad de los nutrimentos y el crecimiento de las plantas usualmente no están relacionadas al contenido total del nutrimento en el suelo. La nutrición mineral de las plantas dependen del tamaño y disponibilidad de la reserva del nutrimento; la concentración en la solución del suelo y la reserva disponible que pueda mantener; las características de transporte en el suelo; densidad, geometría y mecanismos de absorción de las raíces; y la relación agua-planta. La complejidad de las interacciones biológicas, físicas y químicas y los difíciles muestreos empíricos dificultan el estudio de este fenómeno (Grove et al., 1988).

El fósforo es considerado frecuentemente como el nutrimento más limitante en suelos del trópico húmedo (Denslow, et.al., 1987). El problema principal de estos suelos es su alta capacidad de retención de fósforo. Esto constituye un problema grande de manejo debido a las grandes cantidades de fertilizantes fosforados que son requeridas para cubrir las necesidades de los cultivos. La retención de fósforo es un problema grande en suelos ácidos ricos en sesquióxidos de Fe y de Al y en suelos volcánicos; es un problema menor en suelos calcáreos; y raramente constituye un problema en suelos no volcánicos, no calcáreos o libres de sesquióxidos (Sánchez y Uehara, 1980).

Se considera que en los suelos trópicos más del 60% del fósforo total se encuentra en forma orgánica (Sánchez, 1981) y la importancia de conservar la materia orgánica tiene la función, entre otras, de mantener el fósforo orgánico. Disminuciones de materia orgánica bajo agricultura migratoria están acompañadas por disminución de fósforo orgánico y baja disponibilidad de fósforo inorgánico para las plantas (Acquaye, 1963; Zech et al., 1985). Por lo tanto, sería de esperar que la aplicación de altas cantidades de residuos orgánicos, como ocurre en sistemas de cultivos en callejones, aumentaría o mantendría la cantidad de P orgánico, y la

disponibilidad de P_i . Sin embargo los resultados hasta el momento respecto a P disponible bajo cultivo en callejones son poco alentadores (Yamoah et al., 1986; Lal, 1989; Hagggar et al., 1990), pero no existen datos sobre las reservas de P orgánico, ni sobre sus interacciones con las reservas de P inorgánico.

En general, en suelos trópicos se evalúa la cantidad de fósforo disponible para las plantas a través de extracciones con bicarbonato de sodio (Olsen et al., 1954), con bicarbonato de sodio más EDTA (método de Olsen modificado, Díaz-Romeu y Hunter, 1978) o con fluoruro de amonio y ácido clorhídrico (método de Bray; Bray y Kurtz, 1945). Debido a los problemas de retención, los valores obtenidos son generalmente muy bajos y resulta casi imposible encontrar diferencias entre tratamientos (Tiessen, 1989); además no dan una idea clara sobre la habilidad del suelo para amortiguar el P en la solución.

Algunos autores (Bowman y Cole, 1978; Hedley et al., 1982; Condrón et al., 1985; Tiessen, 1989; Hagggar et al., 1990) consideran que, para entender mejor lo que sucede con la dinámica de fósforo en suelos trópicos, es fundamental evaluar el ciclaje y cambios en las formas de fósforo. Específicamente resulta fundamental poder determinar cuales son las fracciones más fácilmente mineralizables o más disponibles para las plantas. Según

Hedley et al., (1982) la situación ideal sería identificar los diferentes compuestos de fósforo en el suelo y los cambios que en ellos se producen bajo condiciones que inducen la liberación de P en formas orgánicas o inorgánicas y la inmovilización del fósforo en formas orgánicas o inorgánicas. Para esto proponen extracciones secuenciales, que incluyen formas extraídas tanto orgánicas como inorgánicas de fósforo, y que se basan en someter el suelo con extractantes de menor a mayor agresividad extrayendo formas de fósforo de mayor a menor disponibilidad para las plantas. Este tipo de extracción ha mostrado resultados promisorios en suelos moderadamente meteorizados (Tiessen, 1989), así como también en suelos ácidos tropicales (Beck, 1991).

El presente trabajo pretende probar un método de fraccionamiento de fósforo del suelo y utilizarlo para evaluar el efecto de las adiciones orgánicas bajo un sistema de cultivo en callejones. Los objetivos principales de este estudio fueron:

- a) Probar el método de fraccionamiento del fósforo propuesto por Hedley et al., (1982) en un suelo ácido.

b) Evaluar las fracciones según el método de Hedley en un cultivo en callejones instalado hace 9 años en el trópico húmedo (Turrialba).

c) Relacionar las diferencias obtenidas en las fracciones con los rendimientos de los cultivos.

d) Comparar las fracciones según el método de Hedley et al., (1982), en suelos con diferente capacidad de retención de fósforo bajo vegetación similar.

Estos objetivos se basan en la hipótesis de que los suelos bajo cultivo en callejones presentarán una mayor proporción de fracciones más lábiles para las plantas, que los suelos bajo monocultivo sin adiciones orgánicas.

II. REVISION DE LITERATURA

2.1. BREVE RESEÑA SOBRE CULTIVO EN CALLEJONES

El asociar cultivos anuales con árboles es una práctica muy antigua. Quizás provenga de la dificultad de los agricultores de escasos recursos de eliminar los árboles para sembrar cultivos, sin percatarse que a largo plazo estaban obteniendo beneficios tales como: proteger el suelo de lluvias intensas, aumentar la infiltración del agua, mantener la fertilidad del suelo, reducir la escorrentía y la erosión.

Además las hojas secas, la sombra de los árboles reducen la temperatura del suelo y mantienen una condición de humedad que favorece el crecimiento de micro y macroorganismos beneficiosos, contribuyendo también al control de malezas (Kass et al., 1989; Salazar, 1990).

El cultivo en callejones es un sistema donde los cultivos anuales son producidos en los espacios entre surcos de arbustos leñosos o árboles y donde las especies leñosas son podadas periódicamente para evitar sombra excesiva y proveer abono verde al cultivo (Kass et al., 1989).

El sistema de cultivo en callejones es considerado como una alternativa de producción que pretende minimizar

el uso de insumos mientras mantienen rendimientos sostenibles en el tiempo (Harwood, 1987).

Algunas veces los cultivos en callejones solo proporcionan medios de subsistencia, pero son estables ecológicamente, lo que los hace adecuados para el trópico (Kang et al., 1985), donde el monocultivo de anuales conduce indefectiblemente a pérdidas de fertilidad de suelos disminuyendo la producción. Después de 2-4 años de monocultivo la producción se hace insostenible (Jordan, 1985).

En el CATIE, sobre un suelo Typic Humitropept un ensayo de cultivo en callejones se inició en 1982; los resultados demuestran un comportamiento estable del componente arbóreo y un rendimiento satisfactorio de los cultivos asociados (maíz y frijol).

En otras regiones, también se usa este sistema tal es el caso en Yurimaguas (Perú), donde los estudios se iniciaron en 1983 y que además de incorporar el producto de la poda al suelo, recomiendan otros usos de los árboles como: leña, forraje y soportes para construcción. Los resultados indican que el sistema es especialmente beneficioso en el control de malezas.

Según informes de FAO (1984) sobre experiencias en Nigeria, los cultivos en callejones constituyen una técnica versátil, efectiva y ampliamente adoptable en las

prácticas de agricultura conservacionista, principalmente por el éxito en el mantenimiento de la fertilidad del suelo y la productividad de los cultivos en Alfisoles y Entisoles. En suelos de baja fertilidad los beneficios del sistema son menos claros.

Entre los árboles más usados en el sistema de cultivo en callejones puede mencionarse a: *Gliricidia sepium*, *Erythrina poeppigiana* y *Leucaena leucocephala*.

2.1.1. Efectos beneficios de los árboles:

Entre las principales ventajas de asociar árboles con cultivos se considera:

a) control de la erosión: debido a las aplicaciones de productos de las podas que mantienen los niveles de materia orgánica, mejoran las propiedades físicas de los suelos y disminuyen el impacto de las gotas de lluvia. Así, por ejemplo, Lal (1977) ha demostrado que la aplicación de 2-6 t ha⁻¹ de broza elimina la erosión aun en pendientes del 15%.

b) control de malezas: se considera que los árboles pueden ser útiles en este aspecto por el efecto de sombreado del suelo (africanos), o por un efecto directo de la broza, ya sea por presencia de sustancias alelopáticas o porque constituye un impedimento físico a la emergencia

de malezas (Contreras et al., 1991). Los resultados positivos de la asociación de árboles con cultivos anuales en suelos no muy ácidos de la Amazonia peruana son atribuidos por Salazar (1990) en primer lugar a un efecto de control de malezas.

c) mantenimiento de la fertilidad del suelo: los resultados en este punto son contradictorios para el sistema de cultivo en callejones y se discutirán con mayor detalle en el punto 2.1.2.

Los mecanismos por los que se asume que los árboles mantienen la fertilidad del suelo son: retención de nitrógeno atmosférico (cuando se utilizan árboles fijadores de N); reciclaje de nutrientes de capas profundas del suelo a las superficiales; reducción de pérdidas de nutrientes a través del lavado; y reducción de pérdida de nutrientes a través de erosión superficial.

A pesar de que la retención de N es considerada como un aspecto fundamental en el asocio de árboles con cultivos, Beer (1988) ha demostrado que en el caso de cultivos perennes como café y cacao, la producción de broza es una característica de los árboles más importante que la retención de N. Según este autor, la retención de N por árboles leguminosos de sombra no excede los $60 \text{ kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$. Sin embargo, estos árboles contribuyen con 5-

10 t de material orgánico por ha y por año, lo que está dentro del rango de lo que se reporta como aporte de broza de bosques trópicos húmedos (Vitousek y Sanford, 1986).

Así, Beer (1988) señala que la poda de *Erythrina poeppigiana* aporta la misma cantidad de nutrimentos que son aplicados a las plantaciones de café en forma de fertilizantes inorgánicos, aun a las tasas muy altas de fertilización recomendadas en Costa Rica de 270 kg de N, 60 kg de P y 150 kg de K ha⁻¹ año⁻¹.

En el caso específico del fósforo, se considera que aun en bosques trópicos naturales es el elemento más limitante debido a su baja disponibilidad en los suelos (Denslow et al., 1987). Sin embargo, la productividad de los bosques húmedos es alta, ya que hay una serie de mecanismos que aparentemente facilitan su utilización por las plantas: micorrizas, exudados de la rizosfera (silicatos y ácidos orgánicos), microorganismos capaces de movilizarlo y dejarlo disponible para las plantas y mayor eficiencia de utilización de la vegetación natural que es capaz de producir mucha biomasa con bajas concentraciones de fósforo (Jordan, 1985).

Cuando los bosques son eliminados y quemados para instalar agricultura migratoria o pasturas, los mecanismos son eliminados y el P pasa a ser una de las

principales limitantes para la producción. A niveles bajos de P disponible la invasión de malezas y la competencia con los pastos o cultivos aumenta, probablemente porque poseen micorrizas mejor adaptadas o porque son más eficientes en la utilización de niveles bajos de fósforo que especies mejoradas para producir con altos niveles de insumos (Jordan, 1985; Mazzarino et al., 1991b).

Es esta capacidad de los árboles nativos de utilizar el P disponible aun a bajas concentraciones, y devolverlo al suelo por podas o caída natural de hojas lo que se pretende incorporar en sistemas agroforestales .

2.1.2. Contribución de los cultivos en callejones a la fertilidad de los suelos.

Kass et al., (1991a) presentan una amplia revisión de los conocimientos actuales sobre el aporte de los cultivos en callejones a la fertilidad del suelo. Según estos autores, existe mucha variación en los resultados reportados para Latino América y África. Los resultados de las experiencias en África son más positivos que en otros lugares, lo que según Kass et al., (1991a) puede deberse a que en los experimentos africanos se utilizan podas más frecuentes y a menor altura de los árboles que

en Latino America; también los suelos son más fértiles. Fernández (1990) intenta justificar estas diferencias de manejo debido a mayores costos de mano de obra, la cual por lo general es más alta en Latino América que en África.

Los resultados de la revisión de Kass et al., (1991a) indican que, en general, las respuestas de los cultivos en ausencia de fertilizantes inorgánicos, si bien positivas, son bajas, y que la aplicación de, al menos, fertilizante nitrogenado a la mayoría de los experimentos con cultivos en callejones conduce por lo general a aumentos de los rendimientos. Aparentemente solo una pequeña porción (10-25%) del N de las podas es utilizado por el cultivo al que éstas son aplicadas (Haggar, 1990; Guevara, 1976) una porción considerable es retenida en la materia orgánica del suelo (Mulongoy y Sagginga, 1990) y probablemente es liberada posteriormente al cultivo. Otra porción es lixiviado o volatilizado.

Existen evidencias de efectos indirectos en la dinámica del N en presencia de árboles. Así, León (1990) señala un estímulo de la retención de N en frijol cuando se encuentra asociado a *Erythrina poeppigiana*.

En general, se considera que los productos de las podas de árboles utilizados en cultivos en callejones contienen suficientes cantidades de potasio, magnesio y

calcio como para suplir las necesidades de los cultivos (Kang et al., 1987; Contreras, 1991), incluso en suelos de bajo contenido en cationes (Palm et al., 1989; Salazar, 1990). Especialmente en el caso del potasio, que no se encuentra ligado a ninguna estructura estable, la liberación es muy rápida. En un lapso de 20 días se libera aproximadamente el 90% del K contenido en los residuos de podas (Vilas, 1989).

Respecto al fósforo, Palm et al., (1989) y Salazar (1990), consideran que los contenidos en las podas son generalmente inadecuados para satisfacer la demanda de la mayoría de los nutrimentos extraídos por los cultivos anuales. Contreras (1991) trabajando con dos especies de *Inga* sp., en el cultivo del café considera que los niveles de P en podas serían adecuados a partir de aplicaciones de 16 t ha^{-1} de materia fresca. Sin embargo, debe considerarse que la liberación de P desde los residuos vegetales al suelo es muy lenta. Por lo tanto, en muchos suelos el P sería más limitante en cultivo en callejones que en otros sistemas agroforestales tales como plantaciones de sombra o huertos caseros, donde la extracción de P por los cultivos es menor (Kass et al., 1991; Vilas, 1989).

En experimentos en suelos volcánicos en Costa Rica se ha observado una disminución significativa en los

callejones se explican si se considera que estos sistemas estarían afectando más positivamente a las características físicas de los suelos que a las químicas.

2.2. RETENCION DE FOSFORO EN SUELOS TROPICALES

La retención de fósforo es generalmente entendida como la transformación de formas solubles a formas menos solubles, disminuyendo la disponibilidad para las plantas y la efectividad de fertilizantes fosfatados (Barrow, 1978; Campos, 1987). El problema de la retención de fósforo constituye una de las principales limitantes químicas en los suelos de América Central (Kass et al., 1985; Fox y Searle, 1978).

Según Fassbender (1967), en América Central el 66% de los suelos son deficientes en fósforo, posiblemente por la gran extensión de suelos Ultisoles, Alfisoles y Andisoles que se caracterizan por tener una alta capacidad de retención.

Los mecanismos de retención se explican principalmente por precipitación con formas solubles de Al, Fe o Ca y/o por reacciones de sorción en suelos ricos en sesquióxidos de Fe y Al o en alófanos. Estas partículas se comportan como anfóteras, pero son capaces de retener fosfatos de manera específica incluso por

niveles de P disponible en cultivo en callejones respecto a parcelas sin árboles donde se agrega el producto de las podas de árboles externos a las parcelas (Kass et al., 1989; Sánchez, 1989). Aparentemente cuando los árboles están presentes, absorben una cantidad considerable de P y se acumula en el tronco de los árboles y no vuelve al suelo.

En los sistemas donde se agregan altas cantidades de materia orgánica, los niveles de P orgánico en el suelo pueden aumentar bajo cultivos en callejones, como lo sugiere Haggard et al., (1990).

Los cambios en el contenido de materia orgánica bajo cultivos en callejones son variables. Varios autores señalan aumentos (Kang et al., 1987; Gicheru y Kang, 1989), disminución (Kass, com.pers.; Lal 1989) o poco cambio (Palm et al., 1989) de C orgánico. Resulta significativo, sin embargo, que varios estudios señalan aumentos de biomasa microbiana, considerada como la porción más activa de la materia orgánica (Yamoah et al., 1986; Palm et al., 1989; Mazzarino et al., 1991 en rev.)

Según la revisión realizada por Kass et al., (1991a) existe un acuerdo generalizado en que bajo cultivo en callejones se mejoran las propiedades físicas del suelo.

Estos autores sugieren, por lo tanto, que las respuestas a fertilización inorgánica en cultivos en

encima del punto isoeléctrico de carga, o sea, en un amplio rango de pH del suelo (Sánchez y Uehara, 1980).

A pesar de la gran cantidad de trabajos sobre este tema no es posible, sin embargo, asegurar cuales son los mecanismos que determinan la retención de P ni sus interacciones (Mazzarino et al., 1985).

En suelos del trópico húmedo la retención de P depende principalmente de la mineralogía de las arcillas y de los contenidos de arcilla y coloides amorfos, aluminio intercambiable y materia orgánica (Sánchez y Uehara, 1980; Ibrahim y Pratt, 1982).

La mineralogía determina claramente la retención del fósforo. Así en suelos con preponderancia de silicatos laminares ésta es baja, excepto cuando las arcillas se encuentran revestidas por sesquióxidos de Fe y Al. Los suelos muy meteorizados con predominio de sesquióxidos o los suelos de origen volcánico compuestos por coloides amorfos presentan una alta capacidad de retención. En suelos con altos contenidos de sesquióxidos, la retención es mayor cuanto éstos son menos cristalinos, debido a una mayor área superficial.

En Andisoles la retención aumenta a medida que disminuye la proporción de sílice en la fracción amorfa por meteorización (Fox y Searle, 1978; Sánchez y Uehara, 1980). Considerando suelos de mineralogía similar, la

retención de P aumenta con el contenido de arcillas y coloides amorfos. Las relaciones no son lineares debido a la variación en el grado de cristalinidad de los sesquióxidos. El orden de los Andisoles es el que presenta los niveles más altos de retención de P (Sánchez y Uehara, 1980) debido a su alto contenido en coloides amorfos.

La retención de P se encuentra altamente correlacionada con el contenido de Al intercambiable. Sánchez y Uehara (1980), señalan que 1 meq de Al intercambiable kg^{-1} suelo puede retener hasta 102 ppm de P.

Según algunos autores, la materia orgánica puede aumentar la retención de fósforo debido a la formación de uniones con formas de Fe y Al activo que quedan expuestas en la superficie de partículas de humus. Por otro lado, puede disminuirla por su capacidad de complejar aluminio intercambiable o porque radicales orgánicos pueden bloquear sitios de retención en la superficie de sesquióxidos de Fe y Al (Sánchez y Uehara, 1980; Fassbender, 1978).

En estudios más recientes, Kass et al., (1991b) encontraron que los factores que más afectan a la retención de P en suelos de Panamá y Costa Rica son: a) el Al activo determinado como la suma del Al extraído con

ditionita más el Al extraído con oxalato: a mayor cantidad de Al activo mayor retención, y b) el contenido de materia orgánica y c) el contenido de arcillas: a mayor contenido de materia orgánica y arcillas menor retención. El Al extraído con ditionita indicaría la cantidad de Al ligado a minerales similares a los alofanos (allophane-like constituents) más el Al ligado a la materia orgánica, mientras que el Al extraído con oxalato indicaría el Al contenido en alofanos e imogolitas.

2.3. EVALUACION DEL CONTENIDO DE FOSFORO EN SUELOS TROPICALES

2.3.1. Evaluación de la retención de fósforo:

La retención de P en el suelo se evalúa a través de isotermas de sorción, con las que se describe la relación existente entre la cantidad de P en solución y la sorbida a las partículas del suelo a una temperatura dada. Los datos obtenidos pueden incluirse en ecuaciones (Langmuir, Freundlich, Tempkin) que permiten calcular valores máximos de sorción de P. El problema principal del uso de isotermas consiste en que, al no poder asegurarse cuales son los mecanismos de retención de este elemento, resulta

difícil relacionar el proceso a una ecuación (Barrow, 1978; Mazzarino et al., 1985).

Fox y Kamprath (1970) proponen el uso de isoterma de adsorción para predecir las necesidades de fertilizantes en el suelo, interpolando el valor de F sorbido a una concentración de F en solución de 0.2 mg l^{-1} .

En lugar de utilizar un valor fijo, lo ideal sería calcular los "requerimientos externos de F ", o sea, la concentración requerida por el cultivo considerado para alcanzar un 95 % del rendimiento máximo, ya que para un gran número de cultivos tropicales este valor es menor de 0.2 mg l^{-1} en la solución del suelo (Sánchez y Uehara, 1980; Fox, 1981).

En el caso del maíz, por ejemplo, los requerimientos externos pueden variar entre 0.05 - 0.2 mg L^{-1} . Aparentemente, las variedades de maíz de América tropical toleran mejor las deficiencias de P que aquellas mejoradas para agricultura de altos insumos de las regiones templadas (Fox, 1981; Lantigua 1989).

Las isoterma no permiten distinguir entre diferentes grados de disponibilidad del fósforo en el suelo.

2.3.2. Evaluación de la disponibilidad de fósforo.

2.3.2.1. Fósforo inorgánico (Pi):

Un suelo es un intercambiador de iones. Los intercambiadores de iones son sustancias sólidas que tienen un exceso de carga eléctrica en su estructura, que son compensadas por iones de carga contraria, adsorbidas en la superficie, los llamados iones intercambiables. Los suelos con predominio de silicatos laminares presentan cargas eléctricas negativas de origen estructural, funcionando así como intercambiadores de cationes. Sin embargo, en los trópicos la existencia de sustancias anfóteras determinan que a bajos valores de pH la carga es positiva transformándose en intercambiadores aniónicos. Los fosfatos son retenidos en estos intercambiadores. Pero, como se mencionó anteriormente, existe en suelos trópicos una retención específica de P incluso cuando la carga predominante es negativa.

Un método de extracción de Pi disponible para las plantas consiste en el uso de resinas de intercambio aniónico. Se asume en este caso que las resinas compiten con el suelo reteniendo fosfatos y que imitan el comportamiento de las raíces que también pueden funcionar como intercambiadoras de iones (Amer et al., 1969).

El Pi determinado con resinas es un buen indicador del fósforo disponible para la planta en diferentes suelos (Muriuki y Barber, 1983; Dalal y Hallsworth, 1977). Según Le Mare (1981), en suelos con alta capacidad de retención de fósforo, el P extraído con resinas se debe combinar con la medida de la actividad del Fe y Al para refinar la predicción del fósforo disponible para la planta.

La eficiencia de extracción de P con resinas depende de las relaciones suelo: agua: resina, del tiempo de agitación, y de la manera en que la resina es mezclada con la suspensión del suelo (Barrow y Shaw, 1978). También es afectada por presencia de otros aniones en altas concentraciones en el suelo, como nitratos o sulfatos (Cooperband y Logan, 1991).

Las resinas de intercambio iónico, son productos sintéticos. Presentan una red tridimensional de cadenas de hidocarbonatos, conteniendo grupos funcionales con cargas eléctricas. La estructura es porosa y flexible, pudiendo saturarse y retener solventes en su interior.

Los productos comerciales usados en análisis de suelos se presentan como pequeñas esferas, de diámetro promedio de partículas 1 mm o menos, (Raij, 1987); también en láminas de 0.57 mm de apertura (Ionics, Inc.

1987)). Para extraer fósforo se utilizan resinas intercambiadoras aniónicas.

Los cambios en el pH pueden causar cambios en la solubilidad del Pi. Diferentes compuestos de Pi pueden tener diferentes solubilidades a diferentes valores de pH y pueden ser usadas para caracterizar la composición de Pi del suelo o para evaluar el Pi disponible para las plantas. (Lindsay y Moreno, 1960; Kamprath y Watson, 1980).

Soluciones ácidas extraen P ligado al calcio debido a un efecto de disolución ácida; por ejemplo, el conocido como extractante de Carolina del Norte o Mehlich 1 formado por una mezcla de HCl y H₂SO₄ diluidos.

Soluciones alcalinas pueden solubilizar fósforo ligado al Fe y Al; por ejemplo, el conocido como extractante de Olsen, consistente en bicarbonato de Na a pH 8.5.

También se utilizan iones complejantes como fluoruro, porque éste forma complejos con el Al liberando P; por ejemplo, los extractantes conocidos como Bray I y II, formado por mezclas de fluoruro de amonio y HCl.

Los aniones orgánicos se pueden usar para quelatar cationes y liberar el Pi dentro de la solución, por ej., EDTA.

Todos los métodos mencionados imitan, en alguna forma, la actividad de las raíces para obtener fósforo de la solución del suelo. De acuerdo a las características del suelo se aconsejan diferentes soluciones extractoras del fósforo disponible para las plantas. La utilización de un determinado extractante dependerá de la respuesta del cultivo en diferentes suelos.

Numerosos métodos se han usado para medir el P_i disponible. Existe una revisión de metodologías muy completa hecha por el Grupo de Trabajo de Normalización de Métodos Analíticos de la Sociedad Española de Ciencia del Suelo (1982).

Un resumen de los métodos más comunmente utilizados en Centro América se presenta en el Cuadro 1. Existe para estos suelos una amplia base de datos disponible, fundamentalmente en extracciones con bicarbonato de sodio y fluoruro de amonio (Grupo de Trabajo de Normalización de la Sociedad Española de la Ciencia del Suelo, 1982).

Cuadro 1. Extractantes más comunes utilizados para determinar F disponible en suelos (Fuente: Diaz Romeu y Hunter, 1978; Kamprath y Watson, 1980).

Nombre comun	Extractante	Relación suelo:solución
BRAY I	0.025N HCl + 0.03N NH ₄ F	1:10
BRAY II	0.1N HCl + 0.03N NH ₄ F	1:7
CAROLINA DEL NORTE	0.05N HCl + 0.025N H ₂ SO ₄	1:4
TROUG	0.002N H ₂ SO ₄ tamponado a pH3 con (NH ₄) ₂ SO ₄	1:10
AC. CITRICO	1% Acido citrico	1:10
EGNER	0.02N Lactato Ca+ 0.02N HCl	1:20
MORGAN	0.54N HOAc + 0.7N NaOAc pH4.8	1:10
OLSEN	0.5M NaHCO ₃ pH 8.5	1:20
OLSEN MODIFICADO	0.5M NaHCO ₃ +0.1% EDTA pH8.5	1:10

2.3.2.2. Fósforo orgánico (Po).

El papel y contribución del Po a la planta parece ser de más importancia en los trópicos que en las zonas templadas (Dalal, 1977; Tiessen et al., 1984).

Los compuestos de Po que pueden representar hasta más del 50% del fósforo del suelo; se presentan fundamentalmente en forma de fosfatos de inositol (Sposito, 1989).

Los métodos de extracción del Po se han desarrollado en soluciones alcalinas, como NaHCO_3 o NaOH , (Bowman et al., 1978b) o varios solventes orgánicos como acetilacetona que disuelven la materia orgánica (Condrón et al., 1985).

El rol del Po para proveer a la planta Pi disponible ha sido bien establecido por Stewart y Tiessen (1987) y es muy importante en suelos muy meteorizados como lo anotan Acquaye (1963); Adepteu y Corey (1976); Agboola y Oke (1976); Dalal (1979); Sánchez (1981); White y Ayoub (1983); Tiessen et al., (1984); Zech et al., (1985). Sin embargo, pese a los informes de la importancia agronómica del Po, su determinación no constituye una prueba rutinaria en los análisis de laboratorio.

En varios estudios se ha evaluado el papel específico del Po en términos del reciclaje del fósforo y el aprovechamiento por la planta. En el caso del Po extraído con bicarbonato de sodio, se ha encontrado una alta correlación con el fósforo disponible para la planta (Bowman y Cole, 1978a). En suelos con bajo contenido de Pi disponible, el Po extraído con NaOH según Chauhan et

al., (1981) es una fuente importante de P para los microorganismos.

Los ácidos fúlvicos (ácidos de la materia orgánica solubles en NaOH y HCl) asociados al P constituyen una gran fracción del P_o en muchos suelos (Krivonosova y Basevich, 1980). Derivan de materiales orgánicos recientes y de la broza (Grindel y Zyrin, 1965), y son considerados como relativamente disponibles (Bowman y Cole, 1978b). Los ácidos húmicos (ácidos de la materia orgánica solubles en NaOH, pero insolubles en HCl) son asociados al ciclo del P en menor forma, y son menos afectados por perturbaciones a corto plazo (Grindel y Zyrin, 1965; Batsula y Krivonosova, 1973; Bowman y Cole, 1978b).

Estos métodos de extracción, en conjunto con experimentos biológicos, ayudan a entender la disponibilidad biológica de las fracciones extraídas, y sirven para investigar los procesos que involucran la redistribución del P en el suelo (Stewart y McKercher, 1982).

2.3.2.3. Fósforo microbial (P_m).

Existe en la actualidad un creciente interés por determinar cual es la porción activa de la materia

orgánica, o sea, la materia orgánica fácilmente mineralizable. Se considera que una parte importante de la materia orgánica activa es la biomasa microbiana cuyo tiempo de retorno es de aproximadamente 0.14-3 años (Parton et al., 1989).

Existen numerosas mediciones de C o N retenido en biomasa microbiana. El P_m se determina como diferencia entre el P extraído después de tratar con un biocida y el P inicial, utilizando agentes extractantes específicos (Chauhan et al., 1979). Sin embargo, la determinación de P_m es dificultosa debido a la rápida capacidad de retención de P en el suelo (Hedley et al., 1982; Sparling et al., 1979).

McLaughlin (1985) probó diferentes biocidas para estudiar la habilidad de algunos microorganismos del suelo en liberar fósforo. Entre los productos que usó, los más efectivos y menos perjudiciales fueron el cloroformo y el hexanol; como extractante utilizó bicarbonato de sodio. Según este autor, la microflora difiere de suelo a suelo y con ello la cantidad de P que es liberado por lo que se hace necesario calibrar para cada suelo.

Aparentemente menos del 10% del P_o del suelo se encuentra retenido como P_m (Anderson y Malcom, 1974; Anderson y Domsch, 1980; Hedley y Stewart, 1982). Hedley et

al., (1982) reportan valores de P_m que representan aproximadamente 14% del P_o y 2-3% del P total. Sin embargo, estos porcentajes varían mucho dependiendo del factor de recuperación que se utilice para convertir los datos de P extraído con cloroformo a P microbial. Hedley y Stewart (1982), aconsejan usar un factor de 0.4, pero remarcan que la extracción de P_m depende en gran parte de la capacidad de retención de los suelos y, por lo tanto, el factor de recuperación puede variar.

2.3.2.4. Extracciones secuenciales de fósforo

Según Tiessen (1989), los estudios que permiten una mayor comprensión de lo que sucede en los suelos con la dinámica del P son los basados en extracciones secuenciales, particularmente el método propuesto por Chang y Jackson (1957). En este método se emplea secuencialmente NH_4Cl para extraer P_i lábil, NH_4F para disolver P_i asociado al aluminio, $NaOH$ para P_i ligado al Fe , ditionita-citrato para formas de P_i ocluido ligado a formas de Fe muy poco solubles, HCl para disolver P_i ligado al Ca , y el residuo final es analizado como P total por fusión con $NaCO_3$. Williams y Walker, (1967), introdujeron una modificación a este paso final analizando P_o por ignición más extracción ácida.

Los inconvenientes encontrados a esta metodología fueron que parte del P_i reprecipita durante la extracción con fluoruros, y que la separación entre P_i ligado al Fe o al Al o la determinación de P ocluido no son confiables. Tampoco es claro con que se trata el P orgánico. Sin embargo, en estudios posteriores (Kurmies, 1972) se encontró que la secuencia de extracción alcalina-extracción ácida permite distinguir de manera clara entre P_i ligado al $Al+Fe$, y P_i ligado al Ca.

El fraccionamiento en $P-Ca$, $P-Fe+Al$ y en formas más ocluidas o no extractables de P ha servido como base para entender las transformaciones del P en el curso de la pedogénesis en varios estudios en zonas templadas y tropicales (Tiessen, 1989).

Adicionalmente, Kelly et al., (1983) incorporaron el análisis del contenido de P orgánico en todas las fracciones obtenidas por el método de Chang y Jackson (1957), y encontraron que el P_o representa una proporción considerable del P total y juega un papel significativo en la nutrición de las plantas en suelos de bosques templados.

Hedley et al., (1982) han desarrollado un método alternativo de fraccionamiento de P que permite cuantificar tanto las formas lábiles como moderadamente lábiles y recalcitrantes del P tanto inorgánico como

orgánico. El método consiste en una extracción secuencial con resinas intercambiadoras de iones, bicarbonato de Na, NaOH, NaOH después de sonificar, HCl y una extracción final con $H_2SO_4-H_2O_2$.

Se asume que con resinas se extraen las formas de P más disponibles biológicamente y con $NaHCO_3$ pH 8.5 las formas lábiles del P_i adsorbido debilmente en la superficie de sesquióxidos, compuestos cristalinos de P o carbonatos, y parte del P microbial.

Con NaOH se extraen formas moderadamente lábiles de P retenidas más fuertemente en la superficie de minerales de Fe y Al amorfos o poco cristalinos.

Con NaOH y ultrasonido se extraen formas de P retenidas en las superficies internas de agregados.

El P_o extraído con $NaHCO_3$ pH 8.5 representaría formas orgánicas fácilmente mineralizables, según lo determinado por Bowman y Cole (1978b).

El P_o extraído con NaOH representaría formas orgánicas más estables, pero menos mineralizables que las extraídas con $NaHCO_3$ pH 8.5 (Batsula y Krivonosova, 1973).

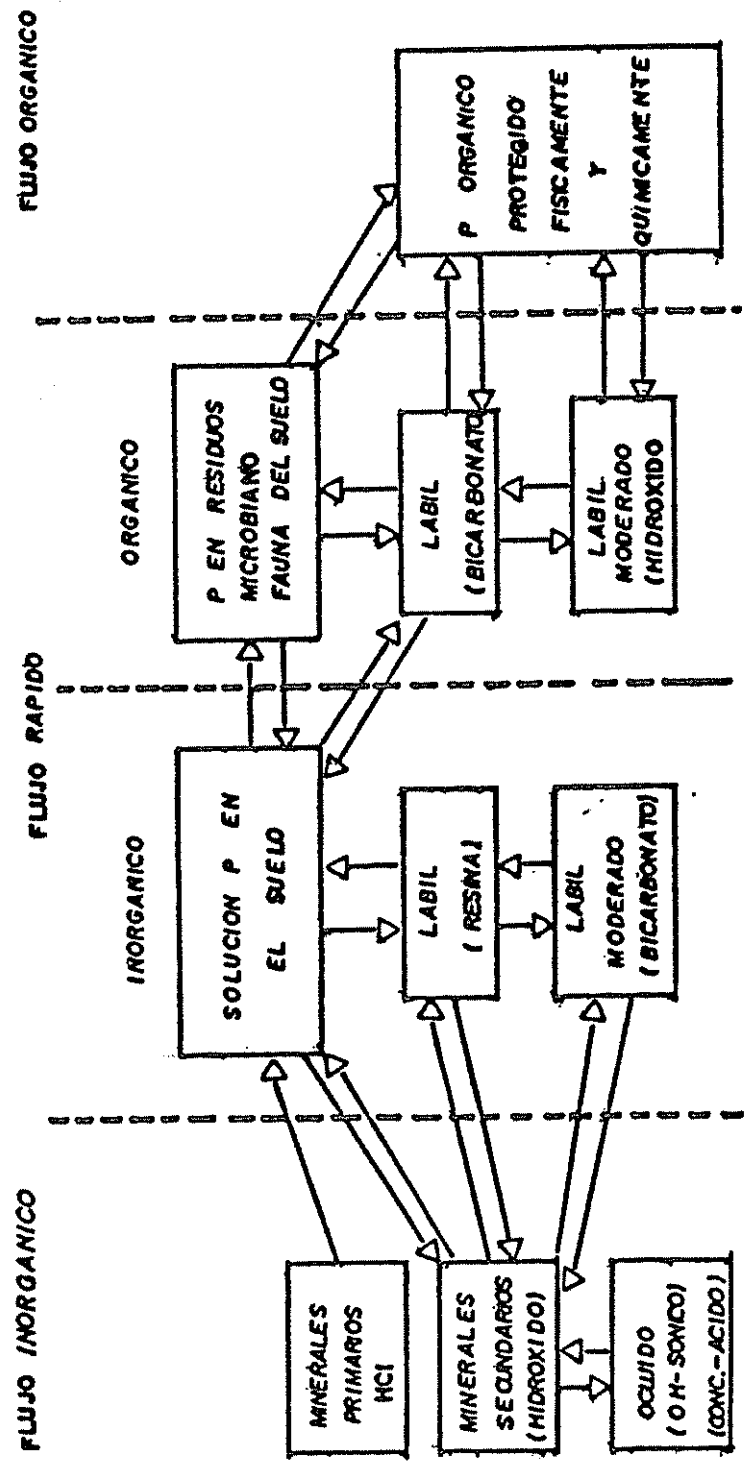
El HCl extraería las formas de P ligadas al Ca, del tipo de la apatita, y en suelos muy meteorizados puede extraer parte del P ocluido.

El residuo extraído por digestión-oxidación con $H_2SO_4-H_2O_2$ representaría una mezcla de Pi cubierto con sesquióxidos (ocluido), Pi incluido en otros minerales, y Po no extractable, Hedley et al., (1982).

Hedley y Stewart (1982) aconsejan también la determinación del P retenido en biomasa microbiana, considerada como una de las formas más fácilmente mineralizables del P orgánico, empleando cloroformo y extrayendo con $NaHCO_3$ pH 8.5. Esta fracción se determina después de la extracción con resinas.

Tiessen et al., (1984) han desarrollado un modelo teórico (Fig.1) que permite asumir las transformaciones del P en el suelo en base a los componentes estimados con el método de Hedley et al., 1982. Según estos autores el ciclo del P en el suelo es un sistema dinámico bajo la influencia de transformaciones químicas a largo plazo, así como también de cambios de corta duración determinados por la absorción por las plantas o por los sistemas de cultivo.

FIGURA 1 COMPONENTES ORGANICOS E INORGANICOS DEL CICLO DEL P EN EL SUELO, EXTRACTANTE QUIMICO INDIVIDUAL (TIESSEN ET AL., 1984)



El desarrollo de los suelos está acompañado por lavado de bases, pérdidas de carbonatos y una actividad cada vez mayor de Fe y Al que determinan la transformación de formas de Pi primarias a secundarias y que influyen también en la estabilización de la materia orgánica y del Po asociado a ella. La abundancia y actividad de las varias formas de Pi y las transformaciones del Po controlan la recarga del P lábil (extraído con resinas) una vez que éste es tomado por las plantas. El Pi retenido en la superficie de arcillas o P amorfo (extraídos con bicarbonato) actúan recargando las reservas de P lábil, mientras que las formas cristalinas más estables (extraídas con NaOH) actuarían por un lado, como un sumidero de formas lábiles, y por otro, como reserva a largo plazo, dependiendo de otras características del suelo como el pH.

El P orgánico cumpliría un rol similar a través de procesos de mineralización.

En el esquema presentado en la Fig.1, Tiessen et al., (1984) consideran al Pi extraído con bicarbonato como moderadamente lábil, sin embargo Hedley et al., (1982) consideran a la suma de resinas más bicarbonato como lábiles.

La aplicación de la metodología de Hedley et al., (1982) y del modelo teórico propuesto por Tiessen et al.,

(1984) han permitido analizar la dinámica del P en suelos bajo cultivo prolongado, en comparaciones entre suelos de diferente intensidad de meteorización en regiones templadas y subtropicales, y para estudiar transformaciones a corto plazo del P lábil o la importancia del P orgánico en el ciclo del P en el suelo (Tiessen, 1989).

Aparentemente la metodología presenta problemas en suelos muy meteorizados debido a la presencia de Fe y Al activo. En estos suelos, el Pi asociado a Al o Fe muestra solubilidades similares al P asociado a ácidos húmicos, por lo que resulta difícil poder separar Po de Pi en la extracción con NaOH. El problema es que los métodos y conceptos que se han desarrollado para las zonas templadas están siendo usados en suelos tropicales mucho más problemáticos que los templados, tanto agronómica como químicamente, por lo que la metodología tradicional debe ser constantemente probada bajo diferentes condiciones (Tiessen, 1989).

Recientemente Beck (1991) ha presentado un estudio basado en este tipo de fraccionamiento en suelos ácidos tropicales, que permite entender diferencias entre las dinámicas del Po y del Pi después de 18 años de cultivo de un Ultisol en la Amazonía peruana.

III. MATERIALES Y METODOS

3.1. Ubicación:

El trabajo se realizó en el Laboratorio de Suelos del Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE), Turrialba, Costa Rica.

Los experimentos analizados fueron:

a) Un experimento de cultivo en callejones donde se aplican adiciones orgánicas a cultivos anuales (maíz-frijol), iniciado en 1982 en el Campo Experimental de CATIE, "La Montaña" (Kass et al., 1989). El experimento se encuentra ubicado a 9° 53' N, 83° 34' W y 602 msnm. La temperatura promedio es de 22°C y la precipitación media anual de 2640 mm, con una época relativamente seca entre febrero-abril. El experimento consiste en 14 tratamientos ubicados según un diseño de bloques al azar con arreglo en parcelas divididas y 3 repeticiones. El tamaño de las parcelas es de 6 m x 18 m.

Para el presente estudio se seleccionaron:

a) un tratamiento con adiciones de mulch de *Erythrina poeppigiana* (Walp.) O.F.Cook, sin ningún tipo de fertilización inorgánica y,

b) cuatro tratamientos sin fertilización nitrogenada, pero fertilizadas con 88 kg ha⁻¹ de P₂O₅

como triple superfosfato y 130 kg ha⁻¹ de KCl: 1) control (sin adiciones orgánicas); 2) cultivo en callejones de *Gliricidia sepium* (Jak.Walp.) plantada a 6 m x 0.5 m (3333 árboles ha⁻¹); 3) cultivo en callejones de *E. poeppigiana* plantada a 6 m x 3 m (555 árboles ha⁻¹) y 4) mulch de *E. poeppigiana* (ramas y hojas).

Las adiciones de mulch en las parcelas sin árboles consisten en aplicaciones de 20 t ha⁻¹ de materia fresca de *Erythrina poeppigiana*. Los árboles en los tratamientos de cultivos en callejones son podados dos veces por año antes de la siembra de cada cultivo. El cultivo analizado en el presente trabajo fue maíz (*Zea mays* L., cv. Tuxpeno C-7) sembrado el 31 de mayo a razón de 40.000 plantas ha⁻¹ y cosechado el 9 de octubre de 1991. La poda se realizó 15 días antes de la siembra (en el caso del mulch solo, fue aplicado 6 días antes de la siembra). La fertilización con P y K se aplicó 36 días después de la siembra.

c) Para comparar la distribución de las fracciones del P en suelos con diferentes capacidades de retención se seleccionaron tres suelos:

1) un suelo de baja capacidad de retención de P, (Mollisol), proveniente de Managua, Nicaragua (Finca El Plantel, Universidad Nacional Agraria), clasificado como Duric Haplustoll, en topografía plana y pendientes del 2-

4%. A una altura de 600 msnm. La temperatura media en la zona es de 29°C y la precipitación promedio anual de 1600 mm, con 5 meses de sequía marcada.

2) un suelo con capacidad intermedia de retención de F, correspondiente al experimento de La Montaña descrito en el punto anterior, clasificado como Typic Humitropept, en topografía plana y pendientes del 0-3%.

3) un suelo con alta capacidad de retención de F, (Andosol), proveniente de San Juan Sur, Costa Rica, clasificado como Typic Fluvudand, en pendientes del 15-35%.

En los últimos dos casos la temperatura media es de 21.5 °C y la precipitación media anual de 2636 mm, con una época relativamente seca entre febrero y abril.

Todos los suelos poseen una cubierta vegetal similar, consistente en monocultivos sin adiciones orgánicas. La capacidad de retención de los suelos fue determinada en estudios previos con el método de Fox y Kamprath (1970). Las isotermas respectivas se presentan en la Fig.2. En el Cuadro 2 se presentan las características de fertilidad de los tres suelos analizados.

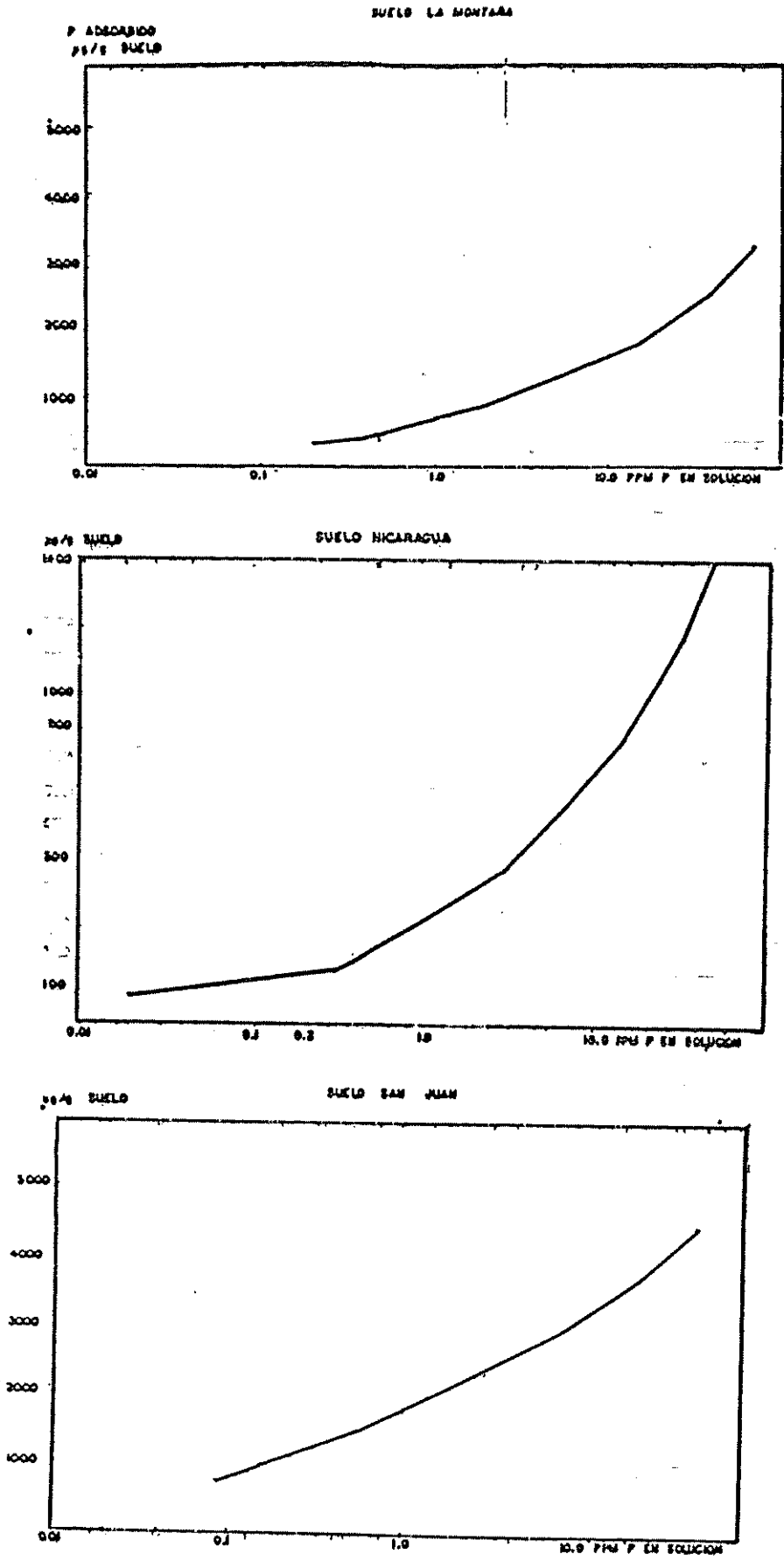


Fig 2 Isothermas de sorción en suelos de diferente pedogénesis Inceptisol (La Montaña), Mollisol (Nicaragua), Andisol, (San Juan)

Cuadro 2. Características de fertilidad de los suelos de La Montaña, Nicaragua y San Juan Sur. Análisis realizados en Laboratorio de Suelos de CATIE, 1991.

ANÁLISIS	Inceptisol	Mollisol	Andisol
pH H ₂ O	5.30	7.10	4.40
MO %	5.00	3.60	8.30
H %	0.27	0.18	0.43
P mg L ⁻¹	4.20	7.50	1.40
K cmol (+)L ⁻¹	0.70	0.90	0.18
Ca cmol (+)L ⁻¹	7.10	23.80	0.34
Mg cmol (+)L ⁻¹	1.40	4.99	0.17
Acidez inter.	0.22	0.12	1.34
% sat.ácida	2.30	0.40	66.00
Cu mg L ⁻¹	26.90	9.20	21.70
Zn mg L ⁻¹	5.50	0.70	1.50
Pb mg L ⁻¹	31.60	0.90	8.00

3.2. Muestreo:

En el caso de los tratamientos provenientes de La Montaña se tomaron las muestras en tres épocas diferentes:

- una semana antes de la poda
- treinta días después de la aplicación de las podas
- noventa días después de la aplicación de las podas

Se consideraron estas fechas por la experiencia previa que se tenía sobre dinámica de biomasa microbiana en el mismo experimento (Mazzarino et al., en revisión). Las muestras se tomaron a razón de 10 submuestras por parcela y a una profundidad de 0-20 cm.

En el caso de los suelos de Nicaragua y San Juan Sur las muestras fueron tomadas a razón de 6 submuestras por parcela, y 0-20 cm de profundidad.

Todas las submuestras se homogenizaron en una muestra compuesta, la que fue secada al aire, pasada por tamiz de 2 mm y posteriormente por tamiz de 0.142 mm. Cada muestra compuesta se analizó por triplicado.

3.3. METODOLOGIA

3.3.1. Fraccionamiento de P

La metodología aquí descrita es la que propone Hedley et al., 1982 modificada por Beck (1991), en la Fig. 3 se presenta el esquema propuesto.

En el presente trabajo se realizaron algunas modificaciones para adaptar la metodología a las

condiciones de trabajo del Laboratorio de Suelos de CATIE.

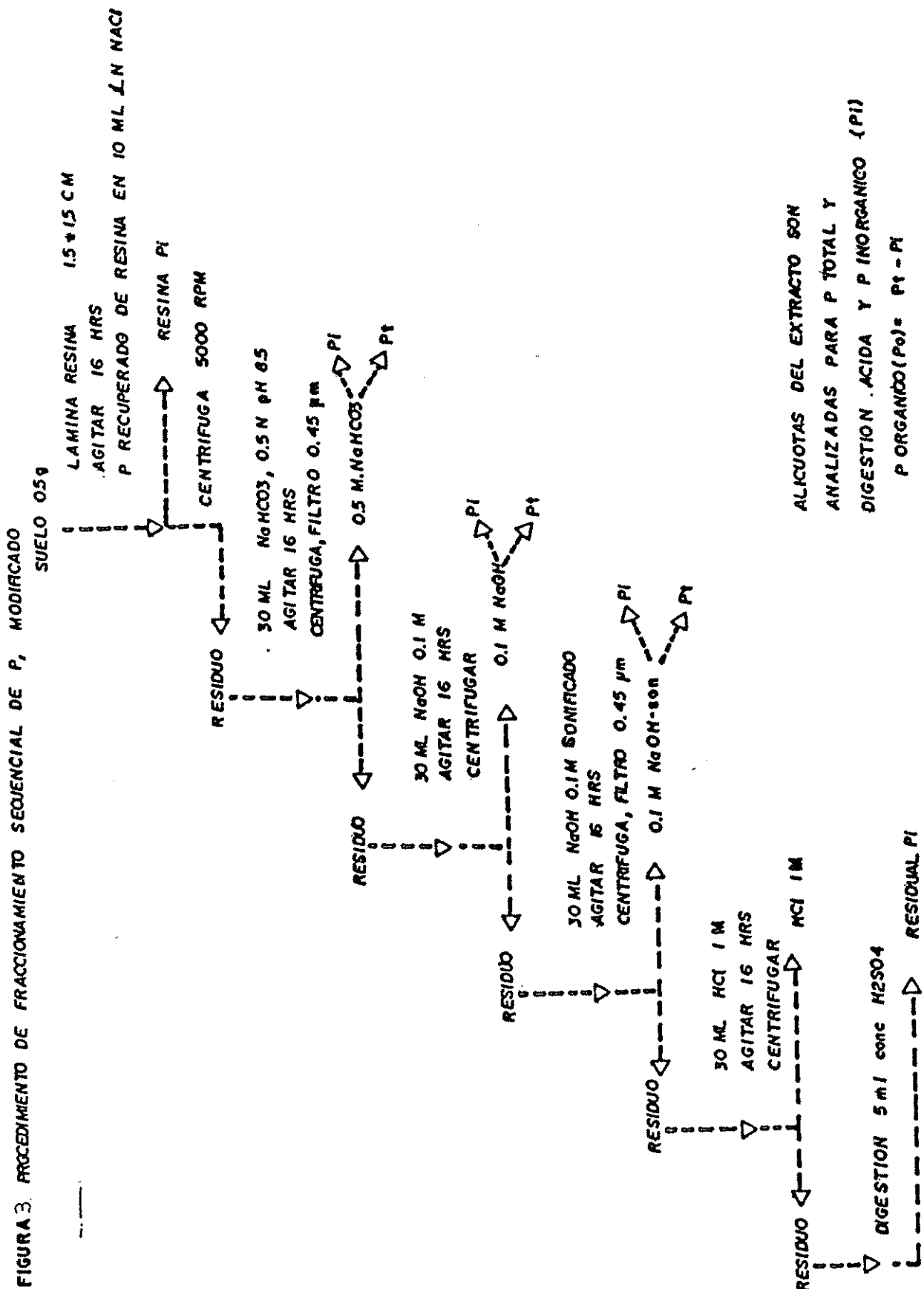
Día 1: Se pesa 0.5 g de suelo seco al aire y tamizado en malla de 0.142 mm en tubo de centrifuga. Se adiciona una lámina de resina intercambiadora de aniones (1.5 * 1.5 cm) y 30 ml de agua purificada. Agitar por 16 horas.

Día 2: Se remueven las resinas, se traspasan a un tubo de centrifuga limpio y se adiciona 10 ml de NaCl 1M, se agita por 1 hora. Las resinas se remueven y se almacenan en refrigeración en solución NaCl 1M para su reutilización.

Los 10 ml de NaCl se trasvasan a volumétricos de 50 ml para leer F por el método de Murphy y Riley (1962).

Mientras se agita, el suelo que está en suspensión se centrifuga a 8000 rpm por 10 minutos (el método original es a 10000 rpm). Se descarta el sobrenadante. En este paso se introdujo una modificación la cual es que no se filtró el sobrenadante. Se agrega 30 ml de NaHCO₃ pH 8.5, y se agita a temperatura ambiente por 16 horas.

Día 3: Se centrifuga la suspensión a 8000 rpm por 10 minutos. Luego se filtra por miliporo de 0.45 um (posteriormente se utilizó Whatman #42, ya que no se perdía suelo).



Se toma una alícuota de 10 ml del extracto, se adiciona 6 ml de H_2SO_4 1.8 N, y se centrifuga a 5000 rpm por 5 minutos. Se corrige el pH a 5.0 - 5.5 con NaOH 4 N.

Del extracto se toma una alícuota de 5 ml la cual se coloca en vasos de precipitados, adicionando 10 ml de H_2SO_4 1.8 N y 5 ml de persulfato de amonio 10%. Se calienta en plancha (200-250 °C) por 25 minutos, o el tiempo necesario para reducir la solución a 5 ml. Se enfría y se corrige pH a 5.0 - 5.5. Se trasvasa a volumétricos de 50 ml para leer P por Murphy y Riley (1962).

Al suelo que quedó en el tubo se le agrega 30 ml de NaOH 0.1 M y se agita por 16 horas.

Día 4: Se centrifuga a 8000 rpm por 10 minutos, se filtra en miliporo 0.45 μm ; el residuo se recoge en recipientes plásticos.

Del extracto se toman alícuotas de 10 ml y se adiciona 1.6 ml de H_2SO_4 1.8N, se centrifuga a 5000 rpm por 5 minutos; luego se toma una alícuota de 2 ml para corregir pH (a 5.0-5.5).

Del mismo extracto se toma una alícuota de 5 ml, agregando 10 ml de H_2SO_4 1.8 N y 5 ml de persulfato de amonio 10%. Se calienta hasta que alcance 5 ml, una vez frío se lleva a volumen de 100 ml con agua purificada; se

toma una alícuota de 25 ml para corregir pH. Se lee F como en los casos anteriores.

El suelo es transferido del tubo a vasos de precipitados, se agregan 5 ml de NaOH 0.1 M, y se somete a un tratamiento con ultrasonido, usando una energía de 75 Watts por 1 minuto; luego es devuelto al tubo de centrifuga, se completa a 30 ml con NaOH 0.1 M y se agita por 16 horas.

Día 5: Se centrifuga a 8000 rpm por 10 minutos, se filtra. Del extracto se toma una alícuota de 10 ml, adicionar 1.6 ml de H₂SO₄ 1.8 N, se centrifuga por 5 minutos a 5000 rpm, y se ajusta el pH como se ha indicado anteriormente.

La otra alícuota de 5 ml, 10 ml de H₂SO₄ 1.8N, más 5 ml de persulfato de amonio 10%, se calienta y se deja enfriar para corregir pH. Se lee F en la misma forma que los días anteriores.

Al suelo del tubo se le agrega 30 ml de HCl 1.0 M. Se agita por 16 horas.

Día 6: Se centrifuga por 10 minutos a 8000 rpm. El sobrenadante se trasvasa a tubos limpios, no se filtra. Se toma una alícuota de 10 ml y se corrige el pH. Se lee F como en los casos anteriores.

El suelo es transferido a erlenmeyer de 250 ml de capacidad, se lleva al extractor de gases y se le agrega

5 ml de H_2SO_4 concentrado. Previamente se ha puesto a calentar la plancha al máximo (aproximadamente 350 °C). Cuando la digestión está bastante avanzada, se agrega 15 ml de H_2O_2 35 vol., y se continua digestiando hasta que el líquido esté transparente; se deja enfriar, se lleva a volumen de 100 ml. Se toma una alícuota de 2 ml para corregir el pH y se lee F de la misma forma como en los casos anteriores.

3.3.2. Determinación de P total

Para medir la eficiencia de la metodología se condujo una determinación paralela al método de P total utilizando la digestión Nitroperclórica, ya que es ésta la que se recomienda en el CATIE, en análisis de rutina (Cooperband y Fernández 1991).

3.3.3. Determinación de rendimiento de maíz.

Para determinar el rendimiento del maíz, se usó el cálculo de porcentaje de humedad del 15% de DOLE (modelo 400 moisture tester).

$$\text{Rendimiento} = \frac{P_g}{P_m} * [100 - \% H / 85] * P_b$$

parcela útil

$$\text{Rendimiento/ ha} = \frac{\text{rend. parcela útil} * 10000}{\text{area cosechada}}$$

donde: P_g = peso del grano de 8 mazorcas.

La biomasa total fue determinada con el peso seco de todas las variables analizadas, en el momento de la madurez fisiológica (tallo, hoja, mazorca).

3.4 Análisis estadístico

Toda la información fue procesada mediante el programa SAS (SAS, 1987). Para analizar el efecto de los tratamientos en el fraccionamiento de F en el experimento de La Montaña, se utilizó Análisis de varianza (ANDEVA) y Análisis de factores rotatorio (factor analysis). Las diferencias significativas entre medias se analizaron por la prueba Duncan.

Se utilizó contrastes ortogonales para analizar las diferencias entre parcelas fertilizadas con F vs. parcelas no fertilizadas; parcelas fertilizadas con adiciones orgánicas vs. parcelas fertilizadas sin adiciones orgánicas, y callejones de *Gliricidia* vs. callejones de *Erythrina*.

En el experimento con suelos de diferente pedogénesis se utilizó ANDEVA y prueba Duncan.

Salvo que se indique lo contrario, el nivel de significancia considerado fue de $p < 0.05$.

IV. RESULTADOS

4.1. Tendencias generales.

4.1.1. Comparación entre los totales de las fechas y los tratamientos.

En el Cuadro 3 se presentan los valores obtenidos para cada fracción por tratamiento y los porcentajes que representan respecto a la suma total de fracciones. En cuanto al total existe una diferencia del 8% entre tratamientos con la máxima y mínima cantidad de P (representando aproximadamente 165 mg kg^{-1} de suelo).

Al comparar los valores del P total obtenido por la suma de las fracciones y el total medido por determinación directa. Estas relaciones se hicieron considerando las importaciones al sistema y lo exportado por los cultivos, en el (Cuadro 4) se observa que hay una diferencia de 5%, que representa alrededor de $100\text{--}170 \text{ mg kg}^{-1}$ de suelo. Esto indica que la recuperación de P a través de las fracciones es aceptable.

Al intentar explicar las diferencias en el P total entre tratamientos en base de diferencias en la adición neta durante 9 años, y el P total medido en el suelo no se encontró relación entre estos valores y el P medido (Cuadro 4). Por lo que se atribuye a una variabilidad natural en el campo y/o en metodología del laboratorio.

En su orden la cantidad de P encontrado en las fracciones queda distribuida de la siguiente manera:

Cuadro 3.- Fósforo extraído en las fracciones según tratamiento.

Los valores entre paréntesis indican el porcentaje de la fracción respecto a la suma total de fracciones. Letras iguales para la misma fracción no son significativamente diferentes para $p < 0.05$.

TRAT	RESIN %	CARBI %	CARBO %	NRI	%	NAO	%	SONI	%	SOMO	%	HCI	%	RESIDUAL	%	TOTAL		
M,OF22.1 c	(1)	29.17 b	(2)	52.11 a	(2)	745.35 a	(34)	342.59 b	(16)	47.8 b	(1)	77.14 a	(5)	15.39 a	(1)	825.46 a	(38)	2157.2 a
OM,F43.1 ab	(2)	58.42 a	(3)	52.26 a	(2)	635.96 ab	(29)	498.86 a	(23)	62.03 a	(3)	72.09 a	(3)	13.42 b	(1)	770.56 a	(35)	2206.8 a
ERY 37.2 bc	(2)	49.4 a	(2)	36.36 b	(2)	554.81 b	(27)	468.19 a	(23)	60.38 a	(3)	57.27 b	(3)	11.84 c	(1)	790.45 a	(38)	2065.9 a
M,+F44.2 ab	(2)	51.65 a	(2)	48.09 a	(2)	659.02 ab	(32)	457.39 a	(22)	57.02 a	(3)	74.75 a	(4)	13.68 b	(1)	678.55 b	(33)	2084.42 a
GLIR60.0 a	(3)	61.44 a	(3)	41.89 a	(2)	696.84 ab	(31)	441.8 a	(20)	58.22 a	(3)	69.86 a	(3)	17.66 a	(1)	782.79 a	(34)	2230.6 a

M,OF= extra
M,+F= CONTROL
ERY= ERYTHRINA
M+F= HULCH
GLIR= GLIRICIDIA

Cuadro 4 Absorción total de P, reciclaje de P y P agregado en los tratamientos (Kg de P ha⁻¹)
 Calculado de Sánchez,1989; Haggar,1990. Los datos de la parcela extra corresponden al último año de medición, asumiendo 0.18% de P en los cultivos, y una densidad aparente de 1.11 g cm⁻³.

Tratam	Importado			Exportado en cultivos	Adiciones netas/año (1-2)	Adiciones netas totales(9años) (3+9)	Exp/Ad. (2/3)	Conversión a mg P kg ⁻¹ suelo (6)
	Fert.	Mulch	Total					
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)		
M,OF	-	23.2	23.2	9.9	13.3	120	0.74	60
OM,+F	38.4	23.2	61.6	12.9	48.7	438	0.26	219
ERY.	38.4	-	38.4	10.0	28.4	256	0.35	128
M,+F	38.4	-	38.4	6.6	31.8	286	0.21	143
GLIR.	38.4	-	38.4	11.8	26.6	239	0.44	120

M,OF = Parcela Extra

OM,+F = Parcel Control

Ery. = Parcela de Callejones de *Erythrina*

M,+F = Parcela de Mulch.

Glir = Parcela de Callejones de *Gliricidia*

HCl < resina < NaHCO₃-Pi ≈ NaHCO₃-Po ≈ NaOHson-Pi ≈ NaOHson-Po << NaOH-Po < NaOH-Pi < Residual.

En general los valores correspondientes a la fracción soluble (resina) son muy bajos y cuentan por entre 1-3% del P total. Las fracciones extraídas con NaOH, tanto orgánicas como inorgánicas, representan un porcentaje considerable del total extraído (16-34%), siendo más altas las correspondientes a las inorgánicas. La fracción con mayor contenido de P es el residual con 33-38% del P total.

Cuadro 5. Fósforo extraído según la suma de fracciones, P total por determinación directa y % de recuperación de las fracciones respecto al P total, en 5 tratamientos de la Montaña. Los análisis corresponden a la fecha 90 días después de la poda.

Fracción	Control	Extra	<i>Glyricidia</i>	Mulch	<i>Erythrina</i>
% Fracción	2227.2	2018.2	2201.2	2091.4	2032.1
P total (H ₂ SO ₄ .H ₂ O ₂)	2115.4	1908.9	2033.6	2019.3	2137.4
% recuperac.	105	105	108	104	95

4.1.2. Efectos de tratamientos:

Los efectos de los tratamientos en las fracciones de P en el suelo pueden observarse en el Figura 4, donde se

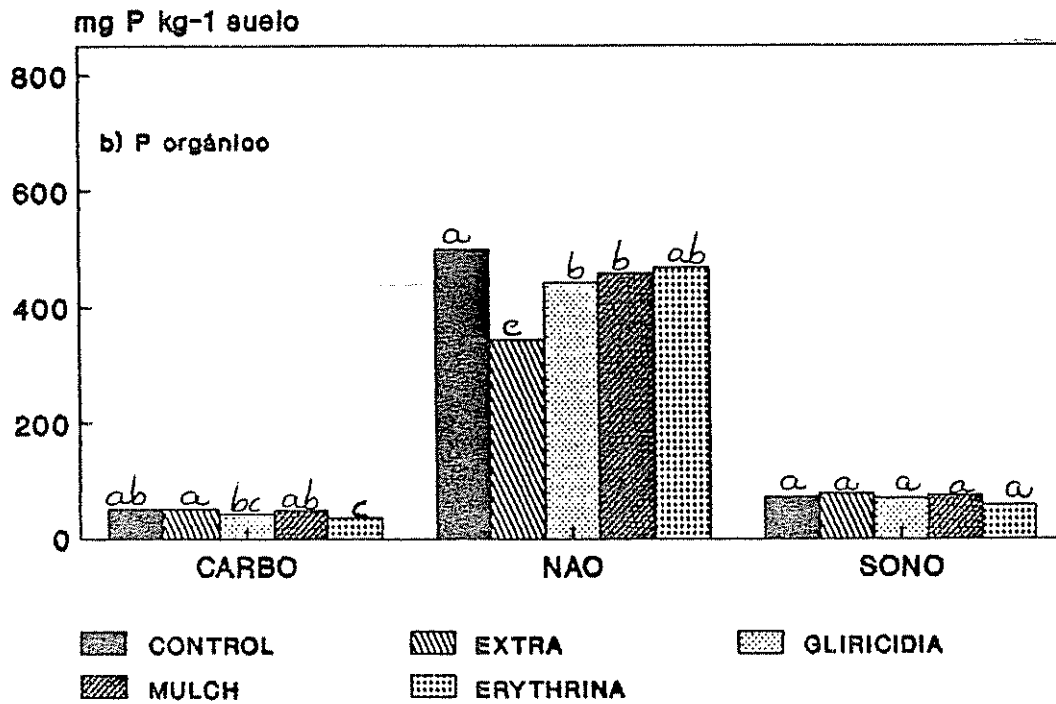
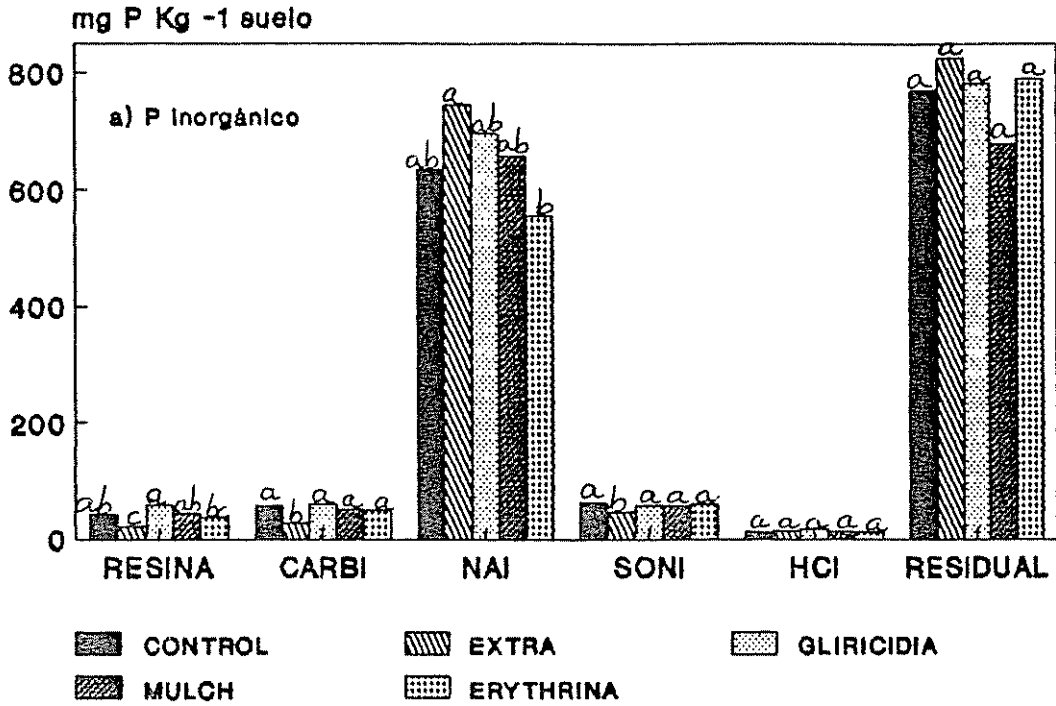


Figura 4. Fracciones de Pinorgánico y orgánico en los tratamientos analizados. Los datos son promedios de 3 fechas de muestreo y 3 repeticiones (n=9). Letras iguales en las mismas fracciones no difieren para $p < 0.05$.

presentan las diferencias significativas entre tratamientos por fracción (Prueba Duncan, $P < 0.05$).

Debido a la cantidad de datos que se trabajaron en esta investigación fue necesario agruparlos de acuerdo a un modelo teórico propuesto originalmente por Tiessen et al., (1984).

De acuerdo a Tiessen las fracciones deberían de agruparse de las siguiente maneras:

Cuadro 6. Fracciones de P en mg Kg⁻¹ de suelo agrupadas de acuerdo a su disponibilidad para las plantas, según los tratamientos.

Trat	F	Pi moder.	F	Pi	Pi/Po				
	Lábil (%)	Lábil (%)	orgánico (%)	recalc. (%)	Lábil				
N ₀ O ₀ F	51	2	793	37	472	22	841	39	1.80
ON ₀ F	102	5	698	32	632	28	784	35	1.27
ERY ₀ F	87	4	615	30	517	27	802	39	1.36
M ₀ F	96	5	716	34	580	28	692	33	1.40
GL ₀ F	121	5	755	34	554	28	801	36	1.60

De acuerdo a las experiencias de Szott (comun. personal), las fracciones deben agruparse según el Cuadro 7.

Estas formas de agrupamiento separan, la fracción resina de las formas lábiles, mientras que Tiessen et al., (1982), incluyen esta fracción más la de NaHCO_3 como lábiles. Szott justifica esta separación considerando que las resinas extraen solo lo que encuentran en la solución del suelo, por lo tanto, las más lábiles.

Cuadro 7. Fracciones del P en mg Kg^{-1} agrupadas de acuerdo a su disponibilidad para las plantas, según los tratamientos.

	P resina %	Pi Labil %	Po Labil %	Resto %	Pi/Po
N_0 OF	23 (1)	775 (36)	395 (18)	966 (42)	1.96
OM_0 F	43 (2)	694 (31)	551 (25)	919 (45)	1.26
ERY_0 F	37 (2)	604 (29)	505 (24)	920 (42)	1.20
N_0 F	44 (2)	711 (34)	505 (24)	823 (44)	1.41
GL_0 F	60 (3)	758 (34)	484 (22)	929 (45)	1.57

donde:

P resina = Pi extraído en resina.

Pi = NaHCO_3 + NaOH fracciones inorgánicas.

Po = NaHCO_3 + NaOH fracciones orgánicas.

Recalcitrante = NaOHson-Pi + NaOHson-Po + HCl (Residual)
ó Resto

Se nota que los callejones de *Girardinia* presentan la mayor parte del F-resina y el mulch solo (Extra), la menor cantidad.

En el caso de Pi lábil ($\text{NaHCO}_3 + \text{NaOH}$), la parcela de solo mulch presenta la mayor cantidad de F en valores absolutos y porcentuales, seguidos de los tratamientos de callejones de *Girardinia*.

En Po lábil ($\text{NaHCO}_3 + \text{NaOH}$), la parcela de solo mulch presenta la menor cantidad de F que los demás tratamientos, en los que no se observan muchas diferencias.

En la fracción resto [$\text{NaOHson (Fi+Po)}_i + \text{Fi-HCl} + \text{Residual}$], no se observan diferencias grandes entre tratamientos.

Al relacionar el Fi/Po, de las formas lábiles se nota que hay en todos los tratamientos más Fi que Po y la relación entre ellas es entre 1.2 y 2.0. Esta relación es más alta cuando no hay fertilizante (Cuadro 5 y 6).

Se hicieron los análisis de contrastes ortogonales para las comparaciones siguientes: 1) parcelas sin fertilización fosfórica vs parcelas fertilizadas (Extras vs. resto de los tratamientos); parcelas fertilizadas sin adiciones orgánicas vs. parcelas fertilizadas con adiciones orgánicas (control vs. mulch, callejones de

Giricidia, callejones de *Erythrina*, y 3) callejones de *Giricidia* vs. callejones de *Erythrina* (Cuadro 8).

Del análisis de contrastes ortogonales se destaca que las parcelas extras (adiciones orgánicas sin fertilizante fosfórico) presentan valores más bajos que los tratamientos fertilizados para las fracciones resina y P bicarbonato inorgánico, P-NaOH orgánico, P NaOH inorgánico. Sin embargo, los valores de Pi en NaOH fueron más altos que en las parcelas fertilizadas.

Se observaron pocas diferencias entre parcelas fertilizadas con P, ya sea en parcelas que recibieron adiciones orgánicas (cultivos en callejones, mulch) o en el control sin adiciones orgánicas. La fracción de P-NaHCO₃ fue significativamente más alta en el control, comparando con los tratamientos que recibieron adiciones orgánicas más P inorgánico (fertilizante).

Entre cultivos en callejones de *Erythrina* y de *Giricidia*, éste último tenía los valores más altos de P resina y bicarbonatos y del extraído con HCl que el tratamiento con *Erythrina*. Sin embargo, bajo *Erythrina* los valores de Po en NaOH fueron más altos que en *Giricidia* (Cuadro 8).

Cuadro 8. Contrastes ortogonales para cada fracción entre
 1) parcelas sin fertilización fosfórica vs parcela
 fertilizadas 2) parcela fertilizada sin adiciones
 orgánicas vs parcelas fertilizadas con adiciones
 orgánicas 3) callejones de *Erythrina* vs callejones
 de *Gliricidia*. El símbolo "-" indica: no significa
 tivo para $P < 0.05$. Entre paréntesis el valor
 absoluto.

	Sin fert.P vs fert.P (Extras vs resto)	Fert. vs fert. org. (control vs M,G,F)	Gl. vs F.
Resina	0.003 (10)	-	0.01 (6)
NaHCO ₃ -Pi	0.0001 (33)	-	0.04 (4)
NaHCO ₃ -Po	-	0.02 (6)	-
NaOH-Pi	0.0001 (35)	-	-
NaOH-Po	0.05 (4)	-	0.05 (4)
NaOHson-Pi	0.0001 (24)	-	-
NaOHson-Po	-	-	-
HCl	-	-	0.0001 (25)
Residual	-	-	-
Total	-	-	-

Para el 1º contrastes: Extras < resto en resina, carbi,soni,
 nao. Extras > resto en Nai.

Para el 2º contrastes: Control > M,G,F en Carbi.

Para el 3º contrastes: Gliricidia > Erythrina en
 resina,carbi y HCl.
 Gliricidia < Erythrina en Nao.

Carbi: NaHCO₃-Pi Pl=mulch
 Carbo: NaHCO₃-Po Gl.= Gliricidia
 Nai : NaOH-Pi F.= Erythrina(Poró)
 Nao : NaOH-Po
 Soni : NaOHson-Pi
 Sono : NaOHson-Po.

4.1.3. Análisis de factores

Los factores son combinaciones lineales de las variables estandarizadas. Se realizó un análisis de factores para todos los tratamientos, a fin de determinar como se agrupan las fracciones y si el tipo de agrupamiento coincide con los modelos teóricos propuestos por Tiessen et al., (1982) presentados en la Fig. 1.

Cuatro factores explicaron el 80% de la variabilidad. Sus correlaciones positivas permitieron asegurar parcialmente el modelo teórico arriba mencionado. Como se observa en el Cuadro 9 donde se presentan las correlaciones significativas para $P < 0.05$, los factores 1 y 2 agrupan a las fracciones inorgánicas lábiles y moderadamente lábiles, factor 3 a la fracción menos lábil extraída con HCl y al factor 4 a las fracciones orgánicas. En algunos factores existen correlaciones negativas que indican los flujos entre fracciones, uno aumenta o disminuye a expensas o a favor del otro.

En el caso del factor 1 hay una relación positiva del P_i extraído en NaHCO_3 y NaOH , y la relación es negativa entre P_o del NaHCO_3 . En el caso del factor 2, las fracciones solubles y las inorgánicas lábiles ($\text{NaHCO}_3 + \text{NaOH}$), se relacionan positivamente. En el caso

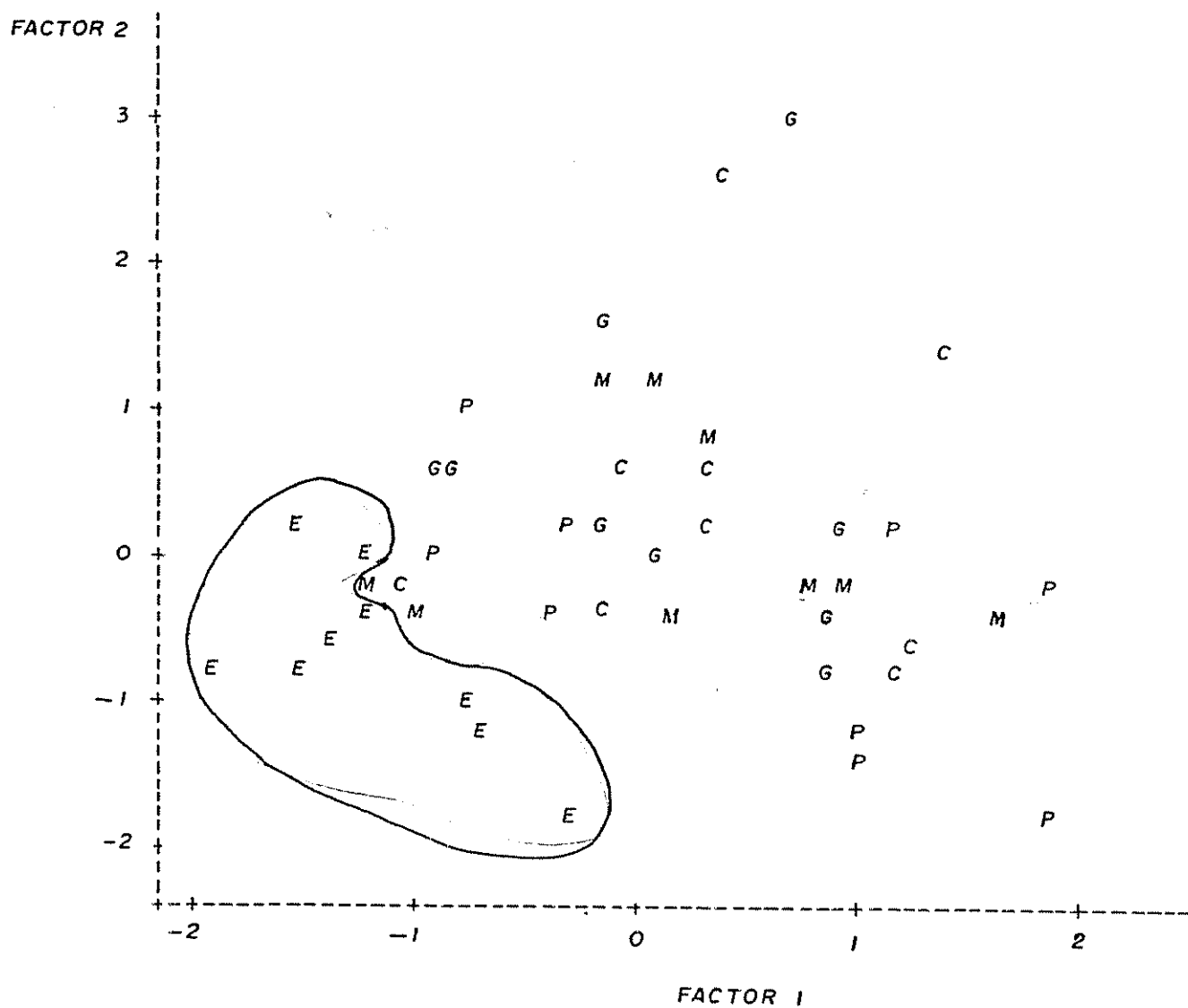


Figura 5. Ploteo de los factores 1 y 2; de acuerdo al análisis para las fechas y tratamientos

del factor 3, explica que las relaciones son negativas entre F-HCl y NaOHson-Po, NaOH-Pi y F solución. En el factor 4, las formas orgánicas presentan correlación negativa con el F residual. Esto sugiere que las formas orgánicas en NaOH actúan para que el Po no llegue a residir al F residual; o sea, el F se mueve de NaOH-Po a la forma residual.

Cuadro 9. Análisis de factores de las fracciones para todas las fechas y tratamientos (n=45). El símbolo "-" indica correlaciones no significativas para $F < 0.05$. Entre paréntesis el % con que se justifica cada uno de ellos.

	FACTORES			
	1 (26%)	2 (21%)	3 (19%)	4 (13%)
Resina	-	0.86	-0.35	-
NaHCO ₃ -Pi	0.42	0.84	-	-
NaOH-Pi	0.88	0.57	-	-
NaOHson-Pi	0.75	-	-0.33	-
HCl-Pi	-	-	0.75	-
F-residual	-	-	-	-0.71
NaHCO ₃ -Po	-0.53	-	-	-
NaOH-Po	-	-	-	0.87
NaOHson-Po	-	-	-0.51	0.47

En la Fig.5 se presenta un gráfico del Factor 1 vs Factor 2 por tratamiento. Los factores fueron aislados

por el análisis de factores al que se hizo referencia en el punto anterior (Cuadro 9). La Fig.5 muestra claramente que el tratamiento correspondiente a las parcelas extras asegura del resto de los tratamientos y se agrupa para los valores más bajos de los dos factores.

4.1.3. Efecto del tiempo.

4.1.3.1 Total de todas las fracciones.

Comparando los totales y la fracción de F residual de las diferentes fechas, las cuales la fecha 30 (30 días después de la poda, 19 días después de sembrado el cultivo de maíz) es diferente a la fecha 0 (una semana antes de la poda) y a la fecha 90. Estos valores no deberían de cambiar en el tiempo fundamentalmente los que corresponden a la fracción recalcitrante. (Cuadro 10).

Por tal razón, para los análisis siguientes no se considera la fecha 30, por lo que el Cuadro 11 sustituye al cuadro 10. En el cuadro 11, se agrupan los valores como se habían presentado previamente.

De acuerdo a estos resultados, hay un aumento en el F-resina con el tiempo, siendo mayor en las parcelas de mulch solo. Se observan pocos cambios con el NaHCO_3 (Cuadro 10). La fracción NaOH-Pi es alto en todos los

Cuadro 10.- Fracciones de P del suelo en mg kg⁻¹ según tratamientos y fechas
 Letras iguales no difieren significativamente para p<0.05 (n=3),
 entre paréntesis el X respecto al total por sumatoria.

Pi	FECHA	CONTROL		EXTRA		BLIRICIDIA		MULCH		PORO	
RESINA	0	27.92 a	(1)	16.8 a	(0.7)	37.26 a	(2)	32.68 a	(2)	24.54 a	(1)
	30	22.11 bc	(1)	15.72 c	(0.6)	36.89 a	(1)	31.42 ab	(1)	18.91 c	(1)
	90	79.55 ab	(4)	35.13 b	(2)	106.05 a	(3)	68.7 ab	(3)	68.15 ab	(3)
Pi NaHCO ₃	0	61.13 ab	(3)	34.2 b	(1)	71.68 a	(3)	55.12 b	(3)	61.13 ab	(3)
	30	42.71 a	(2)	21.61 b	(1)	46.65 a	(2)	47.22 a	(2)	42.71 a	(2)
	90	71.4 a	(3)	31.71 b	(1)	65.99 a	(3)	52.61 ab	(3)	71.4 ab	(3)
Po NaHCO ₃	0	54.33 ab	(3)	64.27 a	(3)	51.81 ab	(3)	50.59 ab	(3)	40.59 b	(2)
	30	47.4 a	(2)	31.82 a	(1)	24.03 a	(2)	34.12 a	(2)	25.74 a	(1)
	90	55.05 a	(2)	60.23 a	(3)	49.83 a	(3)	59.56 a	(3)	42.76 a	(2)
Pi NaOH	0	522.62 a	(25)	758.86 b	(32)	447.19 ab	(21)	473.77 ab	(24)	500.53 ab	(25)
	30	530.89 a	(23)	326.26 b	(13)	489.63 ab	(21)	519.39 a	(24)	509.08 a	(23)
	90	443.06 a	(20)	288.53 b	(14)	388.58 a	(18)	379 a	(18)	395.13 a	(19)
Po NaOH	0	453.94 a	(22)	610.07 a	(26)	567.33 a	(27)	502.63 a	(26)	462.79 a	(23)
	30	845.33 a	(37)	1029.47 a	(42)	949.69 a	(40)	831.37 a	(38)	685.78 a	(31)
	90	608.62 a	(27)	596.52 a	(30)	573.51 a	(26)	643.05 a	(31)	515.87 a	(25)
Pi NaOHson	0	61.21 a	(3)	41.74 b	(2)	58.3 a	(3)	50.53 ab	(3)	52.05 ab	(3)
	30	59.21 a	(3)	51.67 b	(2)	57.91 ab	(2)	61.36 a	(3)	62.13 a	(3)
	90	65.67 a	(3)	49.99 b	(2)	58.44 ab	(3)	59.17 ab	(3)	66.97 a	(3)
Po NaOHson	0	39.09 a	(2)	58.05 a	(2)	32.77 a	(2)	43.94 a	(2)	25.71 a	(1)
	30	93.47 a	(4)	88.29 a	(4)	86.84 a	(4)	92.2 a	(4)	77.9 a	(4)
	90	83.7 a	(4)	85.09 a	(4)	89.97 a	(4)	88.11 a	(4)	68.18 a	(3)
Pi HCl	0	21.27 ab	(1)	22.49 ab	(1)	26.67 a	(1)	21.97 ab	(1)	19.14 b	(1)
	30	12.4 ab	(0.5)	15.65 a	(1)	17.07 a	(1)	13.03 ab	(1)	9.66 b	(0.4)
	90	6.61 ab	(0.3)	8.03 ab	(0.4)	9.24 a	(0.4)	6.04 b	(0.3)	6.73 ab	(0.3)
Pi RESIDUAL	0	853.65 a	(41)	758.86 a	(32)	809.33 a	(38)	726.13 a	(37)	805.92 a	(40)
	30	644.45 a	(28)	854.55 a	(35)	679.46 a	(28)	574.41 a	(26)	751.85 a	(34)
	90	813.58 ab	(37)	862.96 a	(43)	859.58 a	(39)	735.12 b	(35)	813.58 ab	(40)
	0	2095		2365		2102		1957		1992	
	30	2298		2435		2388		2204		2184	
	90	2227		2019		2201		2091		2048	

casos y mucho más en la parcela de mulch solo. En general, en las fracciones NaOH-Po los valores absolutos aumentan con el tiempo a excepción de la parcela extra, en términos porcentuales todos los tratamientos aumentan o son constantes.

Al agrupar las fracciones en resina, Pi, Po, y resto (cuadro 11), se nota que con el tiempo P resina aumenta en todos los tratamientos y mucho más en los tratamientos con adiciones orgánicas y fertilizantes que en el caso de mulch solo. Mientras que se nota que disminuye el Pi moderadamente lábil en todos los tratamientos pero más en en la parcela extra. El porcentaje de Po aumenta con el tiempo. (Cuadro 11).

Cuadro 11. Fracciones de P en mg kg^{-1} agrupadas de acuerdo a su disponibilidad para las plantas el tiempo con su respectivo % de acuerdo al total.

Fecha	P Labil %	Pi moder. Lábil %	P orgánico %	P total %	Tot. P/Po					
0	83	1	507	25	612	30	813	40	2015	0.96
30	64	1	551	24	989	43	715	31	2316	0.62
90	127	3	439	21	724	43	824	39	2114	0.78

Se nota el gran contenido de P en la fecha 0, seguido de la fecha 90. El P-lábil, disminuye en fecha 30 para aumentar casi al doble en fecha 90. Por esta razón se agruparon de acuerdo a lo aconsejado por Szott, quedando las fracciones distribuidas de la manera en que presentan en el cuadro 12.

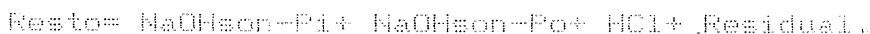
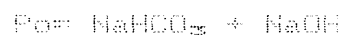
La fracción recalcitrante se mantiene estable, a excepción de la extra.

Los aumentos porcentuales en Po lábil con el tiempo corresponden a las disminuciones en el Pi-lábil.

Cuadro 12. Fracciones de P en mg Kg^{-1} de suelo, agrupados de acuerdo a su disponibilidad para las plantas según los tratamientos y las fechas.

TRAT. FECHA	Resina	Pi lábil	Po lábil	Resto
OM ₁ F				
0	28 (1)	584 (28)	509 (24)	975 (47)
90	80 (4)	514 (23)	664 (30)	969 (46)
OF ₁ M				
0	17 (0.7)	793 (33)	674 (29)	881 (37)
90	35 (2)	320 (14)	657 (33)	1006 (50)
F ₁ G				
0	37 (2)	519 (25)	619 (29)	927 (44)
90	106 (5)	455 (21)	623 (28)	1017 (46)
F ₁ M				
0	33 (2)	529 (27)	553 (28)	843 (43)
90	69 (3)	432 (21)	703 (34)	888 (42)
F ₁ ERY ₁				
0	25 (1)	562 (28)	503 (25)	903 (45)
90	68 (3)	467 (23)	559 (27)	956 (47)

donde:



4.1.4. Rendimiento de maíz en los tratamientos.

Los rendimientos de maíz correspondientes al último año de evaluación (año 9) no mostraron diferencia significativas para los tratamientos considerados en el presente trabajo (Cuadro 13). Sin embargo, se observó que el tratamiento sin fertilización fósforica presentó los valores más altos en la biomasa total de maíz, mientras que los tratamientos sin aplicaciones de adiciones orgánicas (control) y los de callejones de *Ervtrina* presentaron los más bajos.

En el cuadro 14 se presenta una comparación de biomasa total de maíz con el resto de los tratamientos del experimento de La Montaña (año 9), incluyendo parcelas fertilizadas con nitrógeno. Como puede observarse, el control presenta los valores más bajos. Las parcelas extras no son incluidas normalmente en este análisis, que se realiza anualmente en el centro de Computo de CATIE, pero de acuerdo a los resultados se ubicarían como se señala en el cuadro 13, entre el mulch de *Gmelina* y los callejones de *Glyricidia*.

Cuadro 13. Rendimientos del cultivo y biomasa total en Kg ha⁻¹ en los tratamientos estudiados en el experimento de La Montaña. Letras iguales no difieren significativamente para p<0.05

Tratamiento	Rendimientos maíz kg ha ⁻¹	Biomasa total maíz Kg ha ⁻¹
Mulch	2723.0a	7046.4 ab
Extra	2718.2a	7125.5a
<i>Gliricidia</i>	2488.4a	6533.8ab
<i>Erythrina</i>	1992.0a	5024.1b
Control	1817.1a	5074.6b

Cuadro 14 Biomasa total de maíz en todos los tratamientos de La Montaña incluyendo parcelas fertilizadas con Nitrógeno. (Análisis proporcionado por Centro de Cómputo, CATIE).

Tratamientos	Rendimientos biomasa kg ha ⁻¹
Estiércol vaca	9571a
Mulch <i>Gliricidia</i>	7824ab
Mulch <i>Gmelina</i>	7381ab
	<----- 7125.5 EXTRAS
Callejones <i>Gliricidia</i>	6708ab
Mulch <i>Erythrina</i>	6266ab
Callejones <i>Erythrina</i>	6122ab
Control	5667b

4.1.5. Fósforo microbial.

Las determinaciones de fósforo microbial, dejaron bastantes dudas respecto a su determinación, por lo que se presentaron los resultados en un informe aparte. Considerando que su determinación requiere de todo un estudio detallado como para justificar una tesis.

4.2. Fraccionamiento de P en suelos de diferente pedogenesis.

En el cuadro 15 se presenta una comparación entre las fracciones de P en un suelo Duric Haplustoll (Nicaragua), un Typic Humitropept de origen volcánico (La Montaña) y un Typic Fulvudand (San Juan Sur).

La suma total de las fracciones indica que los valores del Mollisol son casi 3 veces más bajos que los del Inceptisol, y los del Andisol representan aproximadamente la mitad del Inceptisol.

Con excepción de las fracciones de NaHCO_3 , resina, y HCl, los valores de P en cada fracción siguen el orden: Inceptisol > Andisol > Mollisol. Las fracciones de P en resina y Pi-NaHCO_3 siguen el orden: Inceptisol > Mollisol > Andisol, mientras que para Po-NaHCO_3 el orden es: Andisol > Inceptisol > Mollisol.

En el Inceptisol, las fracciones predominantes son: Pi-NaOH (20%), Po-NaOH (27%), y F-residual (36%); el resto de las fracciones contienen alrededor de 3% cada uno.

Aproximadamente, 90% del F en el Andisol se encuentra en 3 fracciones: F-residual (45%), Po-NaOH (29%), y el Pi-NaOH (13%); el resto de las fracciones contienen de 0.1 a 4%.

Finalmente, el F en el Mollisol se encuentra predominantemente en el residual (64%) y Po-NaOH (14%), mientras que las otras fracciones cuentan por 2-5% cada uno.

Agrupando las fracciones, F-resina es más baja en el Andisol y más alta en el Inceptisol (Cuadro 16).

El F-resina representa aproximadamente 4% del F total en el Mollisol, en el Inceptisol la mitad; y en el Andisol una fracción muy pequeña del total.

El Pi lábil, en términos absolutos y porcentuales, es más alto en el Inceptisol, intermedio en el Andisol y más bajo en el Mollisol. Aunque los valores absolutos de Po lábil siguen el mismo orden, porcentualmente el Andisol tiene una proporción mayor de F en esta fracción que el Inceptisol o Mollisol. Los valores de F recalcitrante son similares en el Andisol y Mollisol pero es más alto en el Inceptisol. Sin embargo, casi 75% del F

Cuadro 15. Fósforo determinado con la extracción secuencial en muestras de suelo de diferentes capacidad de retención de P. los valores entre () indican % sobre el P total determinado como suma de fracciones. Se incluyen dos determinaciones directas de P total y el % de recuperación obtenido. Los datos de La Montaña corresponden a la fecha 90 del muestreo.

FRACCIONES	S U E L O S		
	Inceptisol	Andosol	Mollisol
	mg P Kg-1 suelo		
	%	%	%
Pi-RESINA	43 (2)	4 (0.3)	34 (4)
Pi-NaHCO ₃	58 (3)	13 (1)	21 (3)
Po-NaHCO ₃	52 (2)	72 (3)	17 (2)
Pi-NaOH	636 (24)	160 (13)	44 (5)
Po-NaOH	499 (23)	361 (29)	115 (14)
Pi-NaOHson	62 (3)	27 (2.2)	16 (2)
Po-NaOHson	72 (3)	45 (4.3)	25 (3)
Pi-HCl	13 (1)	2 (0.1)	33 (4)
Pi-RESIDUAL	771 (35)	562 (45)	530 (64)
Σ FRACCION	2207	1247	831
P-TOTAL (H ₂ SO ₄ .H ₂ O ₂)	2115	973	965
P-TOTAL (NITRICOPERCLORICO)	n.d.	164	884
% RECUP. (H ₂ SO ₄ .H ₂ O ₂)	105	128	86
(NITRICOPERCLORICO)	n.d.	107	94

n.d.= no determinado.

total se encuentra en en el Mollisol, pero solamente alrededor de 50% en el Andisol e Inceptisol.

Cuadro 16. Formas agrupadas de P en mg Kg⁻¹ tres suelos diferentes, de acuerdo a su disponibilidad para las plantas, usando el modelo teórico propuesto. Entre parentésis el % respecto al total.

Suelo	Resina %	Pi %	Po %	Resto %	Pi/Po	I-Residual
Inceptisol	43 (2)	694 (31)	551 (25)	919 (45)	1.26	1.30
Andisol	4 (0.3)	174 (14)	433 (35)	636 (51)	0.40	0.45
Mollisol	34 (4)	65 (19)	132 (16)	603 (73)	0.49	0.49

donde:

T = total

La relación Pi/Po de la fracción NaOH + NaHCO₃ disminuye en el orden: Inceptisol > Mollisol > Andisol; fue un poco mayor a 1.0 en el Inceptisol, y alrededor de 0.5 en los otros suelos. Si consideramos la relación Pi total/Po total, después de descartar la fracción P residual, donde es difícil separar Pi de Po, la relación es más que 1.0 en el Inceptisol (1.30), cerca a 1.0 en el Mollisol (0.94), pero en el Andisol hay más que dos veces Po que Pi.

V. DISCUSION

5.1. Comparación entre totales.

La comparación entre totales indica que la variabilidad asociada con los tratamientos y entre métodos fue de \approx 5-8% ($100-165 \text{ mgF Kg}^{-1}$), por lo que se concluye que no se puede usar este método para detectar cambios a corto plazo en fracciones de F. Tampoco se encontraron diferencias en adiciones netas de F durante los 9 años del ensayo. Pero el método sí parece ser útil para detectar diferencias grandes que ocurren en el campo durante largo tiempo. Hay estudios de laboratorio en que se ha usado el método para detectar respuestas cortas a adiciones de C, N, y F pero este tipo de uso presupone un suelo bien homogéneo y un control estricto sobre procedimientos del laboratorio.

Se debe tomar en cuenta que todas las determinaciones se hicieron en suelos secos al aire, en base a la metodología descrita para suelos de diferente pedogénesis en Tiessen et al., (1984). Si todos los tratamientos en general no tuvieron la misma humedad inicial, esto introduciría un error. Habría sido mejor hacerlos en suelos a su humedad natural o humedecidos a 60% de su capacidad de campo, como se describe en Hedley et al., (1982) y Hedley y Stewart (1982). El hecho de

haber trabajado sobre suelos secos puede afectar directamente al $P\text{-NaHCO}_3$, puesto que los valores aumentan en suelo seco (Searle y Sparling, 1987).

5.1.2 Efecto de tratamientos.

Agrupando las fracciones según el modelo del ciclo del P en resina + NaHCO_3 , Pi-NaOH + NaOH son, P-orgánico y el resto, lo cual representa la fracciones de P lábil y P moderadamente lábil, P orgánico y el recalcitrante, respectivamente, se observa que entre las fracciones de P lábil y las otras fracciones tienen un valor entre 2-5% del P total (Cuadro 6), y en todos los tratamientos las fracciones extraídas con NaOH y P residual representaron más del 85% del P total (Cuadro 3). La fracción de NaOH representa un porcentaje muy alto del P total extraído (hasta 50%), debido a cantidades considerables de Fe y Al activos, ya que tanto el Pi como el Po en NaOH representan formas de P retenidas en compuestos de Fe y Al adsorbidos en la superficie de arcillas (McLaughlin et al., 1977).

Es posible que el fraccionamiento en formas orgánicas e inorgánicas de P extraído por NaOH no sean reales porque la separación de estas dos fracciones en NaOH presenta dificultades en suelos con contenidos altos

de Fe y Al activos. Aparentemente, el Pi asociado a Fe y Al activos presenta una solubilidad similar al P asociado a ácidos húmicos (Tiessen, 1989). Algunos autores (Condrón et al., 1985; Bowman y Cole, 1978) consideran que la extracción con NaOH es más exitosa si se incluye una extracción previa con ácidos (HCl 0.5M o H₂SO₄ 1M), lo que debería probarse en estudios posteriores con el método de Hedley et al., (1982).

El P residual también representa hasta 38%, y contiene probablemente una mezcla resistente de P ocluido cubierto con sesquióxidos, Pi incluido dentro de minerales y Po muy estable (Tiessen, 1989). Dado que esta fracción está pobremente definida en el método de Hedley et al., (1982), resulta difícil definir cual es el tipo de unión que predomina.

El tratamiento de solo mulch presentó los valores de resina y de Po-lábil más bajos que los otros tratamientos. El adicionar materia orgánica sin fertilizante fosforado, en estos tratamientos probablemente resulta en una limitación de P inorgánico para los microorganismos del suelo. Estos microorganismos tomarían P inorgánico de la solución, dando como resultado valores bajos en el P-resina. La poca disponibilidad de Pi puede resultar en la síntesis de enzimas fosfatadas que mineralizan P de compuestos

orgánicos, resultando en valores bajos de P en la fracción P_o -lábil (McGill, 1981). Chauhan et al., (1985) señalan que las adiciones de Pi en presencia de una fuente energética aumentan tanto el Pi como el P_o del suelo.

Los valores más altos de P soluble (resinas) se encontraron en las parcelas fertilizadas. Dentro de éstas, fueron mayores en los callejones con *Gliricidia*. Las parcelas de callejones con *Erythrina* fueron significativamente más bajas que con *Gliricidia* (Cuadro 3).

Esto hace pensar que los residuos de *Gliricidia* contienen más P que *Erythrina*, o la tasa de mineralización de residuos es más rápida en *Gliricidia*, otra posibilidad es que hay secuestro de P en el tronco de los árboles (Sánchez, 1989; Haggard, 1990), el que sería mayor en *Erythrina* que en *Gliricidia*. Ya que entre callejones de *Erythrina* y *Gliricidia* la exportación de P fue casi igual.

Comparando los tratamientos con adiciones orgánicas respecto a solo fertilizantes (control), las adiciones de materia orgánica en presencia de fertilización química resulta en un aumento de P lábil, pero no tenían mucho efecto en el P_o lábil. El aumento de Pi-lábil en los tratamientos con materia orgánica y fertilizantes

probablemente se debe a la mineralización de P de los residuos orgánicos, o al acopleamiento de el Al en materia orgánica. En el caso de cultivo en callejones con *Frytharia* el Pi lábil fue menor que el control tal vez debido a la absorción de P por los árboles y por su secuestro en los troncos.

El poco efecto de las adiciones orgánicas en los tratamientos fertilizados tal vez es debido a que todos son limitados por otro nutriente por ejemplo nitrógeno.

Kass (1991) señala que en la mayoría de los cultivos en callejones en experimentación se observan respuestas positivas al agregado de fertilizante nitrógenado, y que si bien los productos de las podas contienen cantidades considerables de N, solo una pequeña proporción (< 10%) pasa al cultivo asociado en el ciclo de cultivo inmediato a la aplicación de las mismas. También Mazzarino et al., (1991), (en revisión) trabajando con C y N en biomasa microbiana sugieren limitaciones de N en los tratamientos de La Montaña que no reciben fertilización nitrógenada. En el presente estudio solo se consideraron los tratamientos que no recibieron fertilización nitrogenada. Sin embargo, el experimento incluye parcelas fertilizadas con N que deberían ser incluidas en estudios posteriores para constatar esta hipótesis.

El análisis de factores y los datos del cuadro 8, indican que hay una relación negativa entre P_i lábil, y moderadamente lábil y el P_o más lábil ($NaHCO_3$); (factor 1) esto corresponde a la relación mostrada en el modelo de Tiessen et al., (1984). En cambio la relación del P_o - P_i más lábil (resina) no es muy clara en este estudio.

También se observa que P_o representa una relación negativa con el P residual; esto también está de acuerdo al modelo de Tiessen.

La razón entre P_i/P_o , indica que en presencia de fertilizante hay menos valores de P_o , debido a la mineralización de P en los residuos orgánicos.

5.1.3 Efecto en los rendimientos

De los rendimientos obtenidos en el maíz en el presente trabajo destaca fundamentalmente que, si bien el aporte de residuos orgánicos sin fertilización inorgánica alimenta fracciones moderadamente lábiles de P_i , no hay diferencias con el resto de los tratamientos que sí recibieron P inorgánico. Además, la cantidad de biomasa total de maíz producida fue significativamente más alta cuando solo se aplicó abono orgánico. Evidentemente el aumento de P lábil y P orgánico en las parcelas

fertilizadas no se traduce en un aumento de los rendimientos. Estos resultados estarían indicando que:

- 1) El cultivo es capaz de tomar P de fracciones moderadamente lábiles del P inorgánico del suelo;
- 2) no es necesario utilizar fertilizantes inorgánicos cuando se aplica mulch de *Erythrina*;
- 3) si, como se señala más arriba hay un efecto limitante de N inorgánico, es posible que esto esté afectando los rendimientos, de manera que pasa a ser más importante la limitación de N que la distribución de P en el suelo. Sin embargo, debe considerarse que cuando se analizaron todos los tratamientos incluyendo parcelas fertilizadas con nitrógeno (Cuadro 12), los rendimientos de las parcelas extras fueron altos, al menos superiores a los controles y los callejones con árboles.

5.2 Efecto del tiempo.

Los aumentos de P resina con el tiempo son probablemente debido a la aplicación de fertilizante inorgánico; pues el contenido de P de la parcela extra que recibió solo mulch, es menor que en parcelas que recibieron adiciones orgánicas más fertilizante inorgánicos.

La contribución de la mineralización de F de adiciones orgánicas parece de poca importancia, por lo menos a corto plazo, pues el F lábil aumenta o es estable. Hagggar (1990), ha notado que la eficiencia de absorción de N y de mulch por el cultivo es de alrededor de 10%; nuestros datos sugieren que la eficiencia en el caso de F también es baja.

El F lábil, en el caso de mulch solo ilustra los cambios del corto tiempo que causan las diferencias entre tratamientos que hemos observado después de 9 años. Aplicar mulch solo implica una reducción de 9%, en F lábil durante 90 días, probablemente por las razones discutidas anteriormente. La reducción en F_i lábil que ocurrió durante 90 días fue balanceado por aumentos de F_o lábil.

Este efecto de tan corto tiempo es una causa parcial por las diferencias en el F_i/F_o lábiles en tratamientos con solo mulch, comparando con otros tratamientos que hemos estudiado después de 9 años de cultivo (Cuadro 5). Las otras fracciones de F no parecen cambiar, o no participan mucho en cambios que ocurren a corto tiempo, porque esas fracciones no cambiaron mucho en 90 días; excepto nuevamente la parcela de mulch solo, donde la fracción residual aumentó mucho. La razón de que esto ocurriera así no es muy clara (Cuadro 9). Tal vez se

deba a que el P existe en forma de precipitados, ocluida, o en materia orgánica resistente a la descomposición.

5.3 Fraccionamiento de P en suelos de diferente pedogénesis.

Según la teoría de cambios de formas de P durante pedogénesis (Smeck, 1985; Walker y Syers, 1976), con el tiempo, los minerales primarios meteorizan, el P en minerales secundarios aumenta y después disminuye, el P ocluido aumenta a un valor constante y el P orgánico aumenta a un pico y disminuye lentamente después.

Al analizarse tres suelos de diferente pedogénesis, un Mollisol, un Inceptisol con influencia de cenizas volcánicas y un Andisol, resaltan como diferencias fundamentales la proporción de P residual y de P ligado al Fe y al Al (Cuadro 13).

En nuestro caso en el Mollisol la cantidad relativamente grande de P_i-HCl , sugiere que es un suelo joven aunque tiene menos P total, comparando con el Inceptisol y Andisol. Esto nos hace pensar que esos tres suelos se originaron de diferentes rocas madres y ésta es la responsable de la variación del P total en esos tres suelos (cuadro 13).

La proporción del P resina es mayor en el Mollisol que en el Andisol o Inceptisol, probablemente debido al bajo contenido de Al intercambiable y un amortiguamiento mayor de NaHCO_3 y NaOH que había en el Andisol. El pH en el Mollisol es casi el rango donde la disponibilidad de P es máxima. La distribución en esta fracción queda así:

Mollisol < Inceptisol < Andisol

La posibilidad de que las fracciones resina y NaHCO_3 son bajas en Andisol puede ser debido por un uso exhaustivo previo a la instalación del experimento actual, que no es compensado por liberación de las fracciones moderadamente lábiles y orgánicas. Aunque deberían de considerarse los datos del primer ensayo (tiempo).

El términos porcentuales el Mollisol es el más alto en la fracción residual, pero puede ser que contiene minerales primarios que no reaccionan con los extractantes usados en días anteriores. Mirando las proporciones entre Inceptisol y Andisol, sugiere que el Andisol es más viejo que el Inceptisol, por tener mayor contenido de P en esa fracción (Cuadro 13). La proporción de P-NaOH tiene que ver con cantidad y tipo de arcilla que existe en el suelo. Los datos indican que la cantidad de Al y Fe en el Mollisol son bajos comparados al Inceptisol y al Andisol. El Inceptisol tiene mineralogía halloysítica, por lo que esperabamos que tuviera P- NaOH

más alto, debido a la formación de complejos Al-F, en el Andisol el efecto del alto contenido de Al intercambiable probablemente es disminuido por el alto contenido de Materia orgánica (Cuadro 2). Aunque el Inceptisol tiene menos Al intercambiable que el Andisol hay más F y menos proporción de F en la fracción NaOH que en el Andisol. Probablemente el contenido de M.O. en Andisol acompleja con Al o bloquea algunos sitios de adsorción de F, aunque la materia orgánica también puede acomplejar al F. Esto se refleja en el F_0 donde presenta los valores más altos en el Andisol que en el Inceptisol.

La proporción de F recalcitrante en Mollisoles fue mayor que en los otros suelos. Según Tiessen et al., (1984), los Mollisoles contiene una proporción de F orgánico recalcitrante, ya que la materia orgánica en este tipo de suelos es muy estable. Realmente esta fracción está pobremente definida en el método de Hedley et al., (1982).

Las isoterma de retención de F (Fig.3) indican que para 0.2 ppm de F en solución la cantidad de F retenido en el Mollisol es de aproximadamente 160 mg kg⁻¹, en el Inceptisol es 350 mg kg⁻¹ y en el Andisol varia entre 1100-1900 mg kg⁻¹. Kass et al., (1991b) encontraron relaciones altas entre fijación de F y Al total determinado con ditionita y oxalato. Es posible que estas

formas de Al sean mayores en el Andisol y probablemente es la razón de los niveles bajos de P en resina y NaHCO_3 en el Andisol.

En el Inceptisol y Andisol probablemente el P recalcitrante incluye al P_i ocluido cubierto con sesquióxidos, y P_o no-extractable (Tiessen et al., 1984), por lo que resulta imposible definir cual es el tipo de unión que predomina.

VI. CONCLUSIONES

- 1) Aplicaciones a largo plazo (9 años) de abonos orgánicos, con o sin fertilización inorgánica de P, afectan la distribución de las fracciones de P en el suelo, pero no la cantidad total de P extraído, como suma de las fracciones.
- 2) Las adiciones orgánicas sin fertilización fosfórica alimentan fracciones lábiles del P inorgánico del suelo, y resultan en niveles bajos de P soluble y P orgánico.
- 3) La aplicación de fertilización fosfórica está asociada a un aumento de P inorgánico lábil y P orgánico, independientemente de que se hayan agregado o no residuos orgánicos.
- 4) Fertilización con P en presencia de adiciones orgánicas resultan en niveles de P Lábil que son más altas que con fertilizantes solo.
- 5) Es posible que la limitación de otros nutrimentos, especialmente N, estén afectando marcadamente la distribución de P, y que este efecto no sea compensado por las aplicaciones de residuos orgánicos.
- 6) Existen diferencias entre callejones de *Erythrina* y de *Gliricidia*. Bajo *Gliricidia* hay una mayor proporción de P

inorgánico lábil que bajo *Erythrina*. Esto puede deberse a un mayor secuestro de P en troncos de *Erythrina*, o a que hay mayor mineralización de P en *Gliciridia*, o problemas inherentes al análisis, pues en el tratamiento con *Erythrina* se encontraron porcentajes de recuperación del P en las fracciones menores que en el tratamiento con *Gliciridia*.

7) No se encontraron diferencias de rendimientos de maíz entre los tratamientos. Por lo tanto, se deduce que el cultivo es capaz de tomar P de fracciones moderadamente lábiles y, que en estas condiciones no es necesario aplicar fertilizante inorgánico en forma de P y K, cuando se aplican adiciones orgánicas. Sin embargo, es posible que la limitación de N sea mayor que el efecto del P en los rendimientos del cultivo.

8) El fraccionamiento de P en suelos de diferente pedogénesis permite diferenciar algunos factores a los que puede estar ligado el P. En este caso en particular destaca la diferencia entre Mollisoles y suelos de origen volcánico en lo que respecta al P ligado al Fe y al Al. Sin embargo, está muy poco claro el tipo de uniones que se presentan en el P residual y que pueden ser fundamentales para entender el proceso de fijación y liberación de P.

VII. RECOMENDACIONES

1) Para evitar los problemas de distinción entre P orgánico e inorgánico extraído con NaOH en suelos con cantidades considerables de Al y Fe activo se aconseja incluir una extracción ácida antes de las extracciones con NaOH.

2) Se aconseja realizar las mediciones sobre suelos frescos (a su humedad natural) y no secos al aire.

3) Para probar la teoría de que es la falta de nitrógeno la que está afectando la distribución de P en las fracciones, sería fundamental en análisis posteriores incluir los tratamientos que recibieron fertilización nitrogenada. Dado que el procedimiento es largo y costoso se aconseja tomar solo una fecha de muestreo, preferentemente bajo cultivo de maíz que recibe cantidades considerables de fertilizante nitrogenado.

4) Es importante analizar a partir de que momento dentro de los 7 años de estudio en este experimento, los rendimientos en las parcelas sin fertilización (extras), comenzaron a ser similares a los demás tratamientos. Sería la única forma de comprobar cuantos años de aplicación de residuos orgánicos se necesita para obtener resultados similares que en parcela con fertilización inorgánica.

BIBLIOGRAFIA

- ACQUAYE, D. K. 1963. Some significance of soil organic P mineralization in the P nutrition of cocoa in Ghana. *Plant and Soil*. 19: 65-82.
- ADEPETU, J. A.; COREY, R. B. 1976. Organic phosphorus as a predictor of plant available phosphorus in soils of southern Nigeria. *Soil Sci.* 122: 159-164.
- AGBOOLA, A. A.; OKO, B. 1976. An attempt to evaluate plant available P in western Nigerian soils under shifting cultivation. *Agro. J.* 68: 798-801.
- AMER, F.; MAIDI, S.; ALRADI, A. 1969. Limitations in isotopic measurement of labile phosphate in soils. *J. of Soil Sci.* 20: 91-100.
- ANDERSON, J. P. E.; DOMSCH, K. H. 1980. Quantities of plant nutrients in the microbial biomass of selected soils. *Soil Sci.* 130: 211-216.
- ANDERSON, G.; MALCOM, R. E. 1974. La nature of alkali-soluble soil organic phosphorus. *J. Soil Sci.* 25: 282-297.
- ANDERSON, J. P. E.; DOMSCH, K. H. 1980. Quantities of plant nutrients in the microbial biomass of select soils. *Soil Sci.* 130: 211-216.
- BARROW, N. J.; SHAW, T. C. 1978. Factors affecting the amount of phosphate extracted from soil by anion exchange resin. *Geoderma*. 18: 309-323.
- BATSULA, A. A.; KRIVONOSOVA, G. M. 1973. Phosphorus in the humic and fulvic acids of some Ukrainian soils. *Soviet Soil Sci.* 5: 347-350.
- BECK, M. A. 1991. Inorganic and organic phosphorus transformations during 18 years of cultivation in

- the Amazon Basin. Thesis Msc. North Carolina State Univ. Raleigh. 110p.
- BEER, J. 1988. Litter production and nutrient cycling in coffee (*Coffea arabica*) or cacao (*Theobroma cacao*) plantations with shade trees. *Agrof. Syst.* 7: 103-114.
- BOWMAN, R. A.; COLE, C. V. 1978a. Transformations of organic phosphorus substances in soils as evaluated by NaHCO_3 extraction. *Soil Sci.* 125: 49-54.
- , 1978b. An exploratory method for fractionation of organic phosphorus from grassland soils. *Soil Sci.* 125: 95-101.
- BRAY, R. H.; KURTZ, L. T. 1945. Determination of total, organic and available forms of phosphorus in soils. *Soil Sci.* 59: 39-45.
- CAMPOS, W. A. 1987. Manipulación del cultivo de frijol (*Phaseolus vulgaris*, L.) para superar diversos mecanismos de retención de fósforo en suelos de Centroamérica. Tesis Msc. CATIE-Turrialba, C.R.
- CHANG, S.C.; JACKSON, M. L. 1957. Fractionation of soil phosphorus. *Soil Sci.* 84(2): 134-144.
- CHAUHAN, B. S.; STEWART, J. W. B.; PAUL, E. A. 1981. Effect of labile inorganic phosphate status and organic carbon addition on the microbial uptake of phosphorus in soil. *Can. J. Soil Sci.* 61: 373-385.
- CONDON, L. M.; GOH, K. M.; NEWMAN, R. H. 1985. Nature and distribution of soil phosphorus as revealed by a sequential extraction method followed by P^{32} Nuclear Magnetic resonance analysis. *J. Soil Sci.* 36: 199-207.
- CONTRERAS, F. M. 1991. Efecto de la cobertura muerta de *Inga densiflora* Benth. e *Inga edulis* Mart., en el crecimiento inicial de plántulas de caféto (*Coffea*

arabica cv. catuai) y maiz (*Zea mays* L. híbrido Salvadoreño H-5). Tesis Msc. CATIE.

COOPERBAND, L.; FERNANDEZ, C. 1991. Modificaciones en el método mde F total. (Según "Methods of soli analysis Part 2: Chemical and Microbiological properties, 2n. edition". p 406-407.

COOPERBAND, L.; LOGAN, T. J. 1991. Measuring in situ changes in labil soil F in a humid tropical silvopastoral system with anion exchange membranes. Agronomy Abstract. Annual metting of the A.S.A.; C.S.S.A y S.S.S.A, Denver, Colorado.

DALAL, R.C.; HALLSWORTH, E.G. 1977. Measurement of isotopic exchangeable soil F and interrelationship among parameters of quantity, intensity and capacity factors. Soil Sci. Soc. of Am. J. 41: 81-86.

DALAL, R. C. 1979. Mineralization of carbon and phosphorus from C¹⁴ and P³² labelled plant material added to soil. Soil Sci. Soc Am. J. 43: 913-917.

✓ DENSLow, J. S.; VITTOUSER, F. M.; SCHULTZ, J. C. 1987. Bioassay of nutrient limitation in a tropical rain forest soil. Oecologia 74: 370-376.

DIAZ ROMEU, R. ; HUNTER, H. 1978. Metodología de muestreo de suelos. Análisis químico de suelos y tejido vegetal e investigación en invernadero. Turrialba, Costa Rica. CATIE.

FAO, 1984. Changes in shifting cultivation in Africa. FAO Forestry Paper N. 50. Rome 185pp.

FASSBENDER, H. W. 1978. Química de suelos. San José, Costa Rica. IICA. (Serie libros y materiales educativos N.24). 393p.

✓ FASSBENDER, H. W. 1967. Formas de los fosfatos en algunos suelos de la zona oriental de la Meseta

Central y de las llanuras Atlánticas de Costa Rica. *Fitotecnia Latinoamericana* 3(1-2): 187-202.

FERNANDEZ, E. C.M. 1990. Alley cropping on acid soils. Ph.D. Thesis. Department of soil Sci. North Carolina Univ. 157p.

FOX, R. L. 1981. External phosphorus requeriment of crop. In: *Chemistry in the soil environment*. (M. Stelley; D.M.Kral; M.Kay Cousing Eds.) Madison, WI., ASA. p 223-239. (Special publication n.40).

FOX, R. L.; SEARLE, P.G. E. 1978. Fosphate adsorption by soils of the tropics. In: *Diversity of soils in the tropics*. Am. Soc. Agr. p.97-119. (Special publication n.34).

FOX R. L.; KAMFRATH, E. J. 1970. Fosphate sorption isotherms for evaluating the fosphate requeriment of soil. *Soil Sci.Soc. Am. Proc.* 34: 902-907.

GICHURU, M.F.; KANG, B.T. 1989. *Calliandra calothyrsus* (Meisner) in a alley cropping systems with sequentially cropped maize and cowpea in southwestern Nigeria. *Agron. Systems* 9: 191-203.

GRINDEL, N. M.; ZYRIN, N. G. 1965. Method of determination and the dynamics of organic P compounds in the plow horizon of slightly cultivation practices and by laboratory incubation. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 12: 1391-1401.

GROVE, T.L.; RITHA, S.J.; BOULDIN, D.R. 1988. Relating nutrient and water uptake models to biotic interactions, nutrient cycling and plant growth. *Agric. Ecosy. Envi.* 24: 351-368.

GRUPO DE TRABAJO DE NORMALIZACION DE METODOS ANALITICOS. 1982. Revisión bibliográfica de métodos de extracción de fósforo asimilable en suelos 1957-80. In: *Anales de Edafología y Agrobiología* 1982, tomo 41: 1085-1112.

- GUEVARA, A.B. 1976. Management of *Leucaena* (Lam) de Wit for maximum yield and nitrogen contribution to intercropped corn. Ph.D. Thesis. Univ. de Hawaii, Honolulu, Hawaii, USA.
- HAGGAR, J.F.; WARREN, G.P.; BEER, J.W.; KASS, D.L. 1990. Phosphorus availability under alley-cropping and mulched and unmulched sole-cropping systems. Botany School Cambridge CATIE.
- HARWOOD, R. R. 1987. Agroforestry and mixed farming systems. In: Ecological Development in the Humid Tropics. Guidelines for planners. (A. Lugo, J. R. Clark, and R.D.Child, Eds.) . Winrock International Development, Morrilton, Arkansas. 271-301pp
- HEDLEY, M.J.; STEWART, J.W.B. 1982. A method to measure microbial phosphorus in soils. Soil Biology and Biochemistry 14: 377-385.
- HEDLEY, M.J.; STEWART, J.W.B.; CHAUHAN B.S. 1982. Changes in inorganic and organic soil phosphorus fractions induced by cultivation practices and by laboratory incubations. Soil Sci. Soc. Am. J. 46: 970-976.
- IBRAHMIN, H.S.; PRATT, P.F. 1982. Effects of rate of application and time on phosphorus sorption by soils. Soil Sci. Soc. Am. J. 46: 926-928.
- IONICS, INCORPORATED. 1987. Anion-transfer membranes. Bulletin No. AR 204.3-A. Massachusetts, USA.
- JORDAN, C.E. 1985. Nutrient cycling in tropical forest ecosystems. (Eds. John Wiley and Sons) 190p.
- KAMPRATH, E.J.; MATSON, H.E. 1980. Conventional soil and tissue tests for assessing the F status soils. In: The Role of Phosphorus in Agriculture, (Klasawneh, E.N.C.; Sample and E.J. Kamprath, Eds.). ASA, Madison, WI.

- KANG, B.T.; WILSON, G.F.; LAWSON, T.L. 1987. Cultivo en hileras, una opción estable a la agricultura nómada. ITA. Nigeria.
- KASS, D.L.; FERNANDEZ, I.; SZOTT, L.T. 1991a. Agroforestry as an alternative cropping system in developing countries and its implication for fertilizer user. Presentado en la Reunión de Plant Nutrient Management for sustainable agriculture. IFDC. Alabama, 35662, USA del (7-18 octubre de 1991).
- KASS, D. 1991b. Development of appropriate technology for overcoming different mechanisms of P retention in Central America soils. Final report Project AID-SOT 936-5442.
- KASS, D.; BARRANTES, A.; BERMUDEZ, W.; CAMPOS, W.; JIMENEZ, M.; SANCHEZ, J. 1989. Resultado de seis años de investigación de cultivos de callejones en "La Montaña". Turrialba Costa Rica. El Chasquí No. 19: 5-24.
- KASS, D. L.; ALVARADO, A.; DIAZ-ROMEU, R.; HENAO, J. 1985. Development of appropriate technologies for overcoming different mechanism of phosphorus retention in Central America soils. Proposal for Program in science and technology cooperation. 18 p.
- KELLEY, J.; LAMBERT, M.J.; TURNER, J. 1983. Available phosphorus forms in forest soils and their possible ecological significance. Comm. Soil Sci. Plant An. 14: 1217-1234.
- KRIVONOSOVA, G.M.; BASEVICH, A.N. 1980. Contents and forms the organic phosphates in the soil of the steppe zone of the Ukraine. Soviet Soil Sci. 12:290-294.
- KURMIES, B. 1972. Zur Fraktionierung der Bodenphosphate. Die Phosphorsäure 29:118-151.
- LAL, R. 1989. Agroforestry systems and soil surface management of a tropical Alfisol: III Changes in

- soil chemical properties. *Agroforestry System* 8: 113-132.
- LAI, R. 1977. Some aspects of soil and water conservation in the humid tropics with particular reference to Latin America. In *Memorias del V Congreso Latinoamericano de la Ciencia del suelo y IV Coloquio Nacional sobre suelos*. *Suelos Ecuatoriales* 8: 30-36.
- LE MARE, F.H. 1981. Exchangeable phosphorus, estimates of it from amorphous iron oxides, and soil solution phosphorus, in relation to phosphorus taken up by maize. *J. Soil Sci.* 32: 285-299.
- LEON, E. M. 1990. Dinámica del N en cultivos en Callejones de Foró (*Erythrina poeppigiana*) y madero negro (*Gliricidia sepium*) con frijol común (*Phaseolus vulgaris*). Tesis Mcs. CATIE-Turrialba C.R. 82p.
- LINDSAY, W.L.; MORENO, E.C. 1960. Phosphate phase equilibrium in soils. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 24: 177-182.
- MAZZARINO, M. J.; OLIVA, L.; NUÑEZ, A. NUÑEZ, G.; BUFFA, E. 1991. Nitrogen mineralization and soil fertility in the Dry Chaco Ecosystem (Argentina) *Soil Sci. Soc. Am. J.* 55: 515-522.
- MAZZARINO, M. J.; SZOTT, L. T.; JIMENEZ, M. 1991. (En rev.) Dynamics of soil total C and N, microbial biomass and water soluble C in tropical Agrosystems. (Submitted to *Soil Biology and Biochemistry*).
- MAZZARINO, M. J.; KASS, D.; JIMENEZ, M. 1985. Utilización de distintas formas de evaluación de las isotermas de sorción de fósforo y de factores ligados a la retención del mismo en algunos suelos tropicales. *Ciencia del suelo*. 3(1-2): 43-52.

- McBILL, W. B.; COLE, C.V. 1981. Comparisons aspects of cycling of organic C, N, S and P through soil organic matter. *Geoderma*, 26: 267-286.
- McLAUGHLIN, M.J. ALSTON, A.M. 1985. Measurement of phosphorus in the soil microbial biomass, influence of plant material. *Soil Biol. Biochem.* 17: 271-274.
- MUNLOGOY, K.; SANGINGA, N. 1990. Nitrogen contribution by *Leucaena* in Alley cropping. *ITA Research (1)*: 14-17.
- MURIUKI, S.K.; BARBER, R.G. 1983. A study on the merits of separating tropical soils into groups and using different chemical extractants for different groups in the routine measurement of available soil phosphorus soil analysis. *Comm. Soil Sci. Plant An.* 14: 521-539.
- MURPHY, J.; RILEY, J.F. 1962. A modified single solution method for the determination of phosphate in natural waters. *Anal. Chem. Acta.* 27: 31-36.
- OLSEN, S.R.; COLE, C.V.; WATANABE, F.S.; DEAN, L.A. 1954. Estimation of available phosphorus in soils by extraction with sodium bicarbonate. *U.S.D.A.*
- PALM, C. A.; MCKERROW, K. M.; GIBSENER, K.M.; SZOTT, L.T. 1990. Agroforestry systems in the lowland tropics: Is phosphorus important.
- PARTON, W.J.; STANFORD, R. L.; SANCHEZ, P. A.; STEWART, K. W. B. 1989. Modeling soil organic matter dynamics in tropical ecosystems. (D.C. Coleman, J.M. Oades; G.Uehara, eds.) Univ. de Hawaii press. 157-171p.
- van RAIJ, B. 1987. Analise quimica do solo para fins de fertilidade, por Bernardo Van Raij, J.A. Quaggio, H. Cantarella e outros Campinas, Fundaçao Cargill. 170p.

- SALAZAR, A. 1990. Cultivo en callejones. Algunos resultados de Investigación en Yurimaguas (Cuenca Amazónica del Perú (mimeografiado)).
- SANCHEZ, J. 1989. Análisis de estabilidad de sistemas de producción de cultivo en Callejones. tesis Pcs. CATIE-Turrialba, C.R. 174.p.
- SANCHEZ, F.; UEHARA, G. 1980. Management considerations for acid soil in high P-fixing capacity. In: The Role of phosphorus in Agriculture, Am. Soc. Agro., Madison. p. 421-514.
- SANCHEZ, F. 1981. Suelos del trópico: Características y manejo. San José, Costa Rica. IICA 625 p.
- SAS. 1987. PC-DOS. SAS/STAT Release 603. Copyright 1987 by SAS Institute Inc., Cary,N.C. 27512-800,USA.
- SEARLE, F. L.; SPARLING, G. F. 1987. The effect of air-drying and store conditions on the amounts of sulphate and phosphate extracted from a range of New Zealand topsoils. Comm. in soil Sci. Plant Anal.,18(7): 725-734.
- SMECK, N. E. 1985. Phosphorus dynamics in soils and landscapes. Geoderma,34: 185-199.
- SPARLING, G. M.; WEST A. W. 1988. Modifications to the fumigation-extraction technique to permit simultaneous extraction and estimation of soil microbial C and N. Comm. in Soil Sci. and Plant Analysis 19: 327-344.
- SPARLING, G. M.; WALE, K. N.; RAMSAY, A. J. 1985. Quantifying the contribution from the soil microbial biomass to the extractable P levels of fresh and air-dried soils. Aust. J. Soil res. 23: 613-621.
- SPOSITO, G. 1989. The chemistry of soils. Oxford Univ. Press, Inc. New York. 277p.

- STEWART, J. W. B.; MCKERCHER, R. B. 1982. Phosphorus cycle. In: Experimental microbial ecology. Blackwell Scientific, Oxford. pp.221-238.
- STEWART, J.W.B.; TIESSEN, H. 1987. Dynamics of soil organic phosphorus. Biogeochemistry 4: 41-60.
- TIESSEN, H.; STEWART, J.W.B.; COLE, C.V. 1984. Pathways of phosphorus transformations in soils of differing pedogenesis. Soil.Sci.Soc.Am.J. 48: 853-858.
- VILAS, B.O. 1989. Descomposición de hojarasca y mineralización del nitrógeno de la materia orgánica del suelo bajo cuatro sistemas agroforestales en Turrialba, Costa Rica. Tesis.Msc. CATIE.
- VITOUSEK, P.M; STANFORD R. L. jr. 1986. Nutrient cycling in moist tropical forest. Ann. Rev. Ecol.Syst. (USA) 17: 137-167.
- WALKER, T.W.; SYERS, J.K. 1976. The fate of phosphorus during pedogenesis. Geoderma. 15: 1-19.
- WHITE, R.E.; AYOUB, A.T. 1983. Descomposition of plant residues of variable C/P ratio and the effect on soil phosphate availability. Plant and Soil 74:163-173.
- WILLIAMS, J.D.H.; WALKER, J.W. 1969. Fractionation of phosphate in a maturity sequence of New Zealand basaltic soil profiles. Soil Sci. 107:22-30.
- YAMDAH, C.F.; AGBOOLA, A.A.; WILSON, G.F. 1986. Nutrient contribution and maize performance in Alley cropping systems. Ag. Systems 4:247-254.
- ZECH, W., ALT, H.G.; ZUCKER, A.; KOEGL, L. 1985. ^{31}P -NMR spectroscopic investigation of NaOH-extracts from soils with different land use in Yucatan (México). Zeitschr. Pflanzenern. Bodenk. 148: 626-632.