

CENTRO AGRONÓMICO TROPICAL DE INVESTIGACIÓN Y ENSEÑANZA  
PROGRAMA DE EDUCACIÓN PARA EL DESARROLLO Y LA CONSERVACIÓN  
ÁREA DE POSGRADO

EFFECTO DE ENMIENDAS ORGÁNICAS SOBRE LAS FORMAS Y LA  
DISPONIBILIDAD DE FOSFORO EN UN SUELO INCEPTISOL DE ORIGEN  
VOLCÁNICO.

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

**MAGISTER SCIENTIAE**

por

Jeferson Luis Vasconcelos de Macedo ✓

Turrialba, Costa Rica

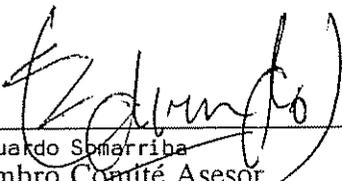
1996

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

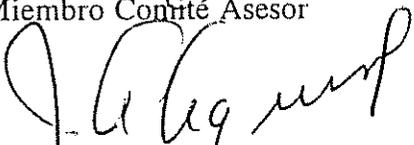
*MAGISTER SCIENTIAE*

FIRMANTES:

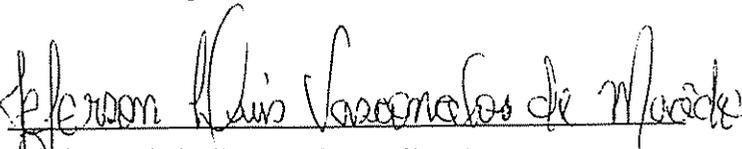
  
\_\_\_\_\_  
Donald Kass  
Profesor Consejero

  
\_\_\_\_\_  
Eduardo Smarriba  
Miembro Comité Asesor

  
\_\_\_\_\_  
Jorge Morera  
Miembro Comité Asesor

  
\_\_\_\_\_  
Juan Aguirre  
Jefe, Area de Postgrado

  
\_\_\_\_\_  
Pedro Ferreira  
Director, Programa de Enseñanza

  
\_\_\_\_\_  
Jefferson Luis Vasconcelos de Macedo  
Candidato

## DEDICATORIA

*“ A todos los investigadores de America Latina y del Caribe que en sus labores diarios buscan desarrollar nuevas tecnologías que mejoren los problemas de la inseguridad alimentaria, de la pobreza y de la degradación de los recursos y del medio ambiente de nuestros paises. “*

## AGRADECIMIENTOS

A Dios, Todopoderoso, por las bendiciones recibidas.

Al Centro de Pesquisa Agroflorestal da Amazônia Ocidental (CPAA) da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA), por brindarme la oportunidad de cursar la Maestría y por costear mis estudios.

Al Dr. Donald Charles Lieber Kass, profesor consejero, por los conocimientos compartidos, las sugerencias, la amistad y el apoyo en el desarrollo de este trabajo.

A los miembros del Comité Asesor Dr. Eduardo Somarriba y Dr. Jorge Morera, por la amistad, las sugerencias y los consejos en la conducción de este trabajo.

A Kenneth Schlather, por enseñarme la metodología de fraccionamiento de fósforo del suelo.

Al personal del laboratorio de suelos, Lic. Marvin Nuñez, Carlos Fernandez y Carlos Castillo por el apoyo en la realización de los análisis de suelo.

A los compañeros, M.Sc. Francisco López Benites y M.Sc. Yudis Heredia por la amistad y por la ayuda en la recolecta de datos de campo y en los análisis de laboratorio.

Al personal del Centro de Computo, en especial al Lic. Johnny Pérez, por la ayuda en la elaboración del programa para análisis de los datos.

A mis estimados amigos, M.Sc. Carlos Armando Villalta, M.Sc. Erick Roberto Salguero y M.Sc. Oscar Vallejos, por la amistad sincera y por los agradables e invidables momentos compartidos.

Al M.Sc. Ismael Hernández, por la amistad sincera, por los agradables e inolvidables momentos compartidos y por la revisión de este trabajo.

A todo el personal de la Biblioteca Orton, por la constante colaboración.

Al personal de campo, en especial a Rigo, por la ayuda en la recolecta de datos de campo.

A mis compañeros de la Promoción 95-96 por los agradables e inolvidables momentos vividos.

Al pueblo costarricense, por la hospitalidad.

A los compañeros paisanos, por compartirem momentos agradables e inolvidables.

A todas las personas que de una u otra forma contribuyeron para el desarrollo del presente trabajo.

## BIOGRAFIA

El autor nació el 10 de Marzo de 1966 en Manaus, Amazonas, Brasil. En Diciembre de 1983, obtuvo el grado de Técnico en Agropecuária por la Escola Agrotécnica Federal de Manaus.

En Septiembre de 1988, obtuvo el título de Ingeniero Agrónomo en la Faculdade de Ciencias Agrárias de la Universidade do Amazonas.

En Septiembre de 1989, ingresó en el Centro de Pesquisa Agroforestal da Amazônia Ocidental de la Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (CPAA/EMBRAPA), donde labora como Investigador hasta la fecha.

En Enero de 1995, ingresó al Programa de Posgrado del CATIE, recibiendo en Diciembre de 1996, el grado de *Magister Scientiae* en Agricultura Tropical Sostenible con énfasis en Sistemas Agroforestales.

## TABLA DE CONTENIDO

|   | PAGINA |
|---|--------|
| RESUMEN .....   | xiii   |
| SUMARY .....  | xiv    |
| 1. INTRODUCCION.....  | 1      |
| 2. REVISION BIBLIOGRAFICA .....   | 3      |
| 2.1. FORMAS Y CONTENIDO DE FOSFORO EN SUELOS TROPICALES .....                   | 3      |
| 2.1.1. Fósforo total ( $P_T$ ) .....  | 3      |
| 2.1.2. Fósforo orgánico ( $P_o$ ).....  | 3      |
| 2.1.3. Fósforo inorgánico ( $P_i$ ).....  | 4      |
| 2.1.4. Fósforo microbial ( $P_m$ ) .....  | 5      |
| 2.2. EXTRACCIÓN SECUENCIAL DE FOSFORO DEL SUELO .....                           | 6      |
| 2.3. SISTEMA DE CULTIVO EN CALLEJONES Y DISPONIBILIDAD DE FOSFORO.....          | 7      |
| 2.4. EMPLEO DE ENMIENDAS ORGÁNICAS Y DISPONIBILIDAD DE FOSFORO EN EL SUELO..... | 9      |
| 3. MATERIALES Y METODOS.....  | 10     |
| 3.1. CARACTERIZACIÓN DEL ÁREA EXPERIMENTAL.....                                 | 10     |
| 3.2. TRATAMIENTOS EVALUADOS.....  | 12     |
| 3.3. MUESTREO DE SUELO PARA FRACCIONAMIENTO DEL FOSFORO .....                   | 13     |
| 3.4. CULTIVOS ASOCIADOS .....   | 13     |

|  |           |
|--|-----------|
| 3.4.1. <i>Maíz</i> .....   | 13        |
| 3.4.2. <i>Frijol</i> .....   | 14        |
| 3.4. UNIDAD EXPERIMENTAL, DISEÑO EXPERIMENTAL Y MODELO MATEMÁTICO .....                      | 15        |
| 3.5. FRACCIONAMIENTO DE FOSFORO DE LAS MUESTRAS DE SUELO.....                                | 16        |
| 3.6. DETERMINACIÓN DEL P <sub>TOTAL</sub> EN LAS MUESTRAS DE SUELO.....                      | 17        |
| <b>4. RESULTADOS Y DISCUSION.....</b>  | <b>19</b> |
| 4.1. EFECTO DE LOS TRATAMIENTOS SOBRE EL CONTENIDO DE P EN LAS FRACCIONES ...                | 19        |
| 4.2. EFECTO DE LA PROFUNDIDAD DE MUESTREO SOBRE EL CONTENIDO DE P EN LAS<br>FRACCIONES ..... | 21        |
| 4.3. EFECTO DE LA ÉPOCA DE MUESTREO SOBRE LOS CONTENIDOS DE P DE LAS<br>FRACCIONES .....     | 22        |
| 4.4. INTERACCIONES ENTRE LAS FRACCIONES DE P DEL SUELO.....                                  | 24        |
| 4.5. CONTENIDO DE P EN LAS FRACCIONES Y RENDIMIENTO DE LOS CULTIVOS .....                    | 27        |
| 4.6. BALANCE DE P EN EL SUELO Y RENDIMIENTO DE LOS CULTIVOS .....                            | 28        |
| <b>5. CONCLUSIONES.....</b>  | <b>30</b> |
| <b>6. BIBLIOGRAFIA.....</b>  | <b>31</b> |

## LISTA DE CUADROS

| CUADROS  | PAGINA |
|--|--------|
| Cuadro 1. Cronograma de las actividades realizadas durante el periodo de estudio.....  | 15     |
| Cuadro 2. Contenido de fósforo en las fracciones y P Total de las muestras de suelo de los tratamientos evaluados, para el periodo de junio/95 hasta junio/96. Profundidad 0 -20 cm. Valores en mg de P/kg de suelo..... | 20     |
| Cuadro 3. Contenido de fósforo en las fracciones y P Total medidos a diferentes profundidades, para el período de junio/95 hasta junio/96. Valores en mg de P/kg de suelo.....   | 21     |
| Cuadro 4. Estimación de la cantidad de P incorporado en la biomasa del maíz y del frijol durante un año agrícola. La Montaña, Turrialba, Costa Rica. 1996. Valores en kg de P/ha.....                                    | 22     |
| Cuadro 5. Variación en el contenido de P de las fracciones y P Total de los tratamientos evaluados, en función de la época de muestreo. Valores en mg de P/kg de suelo.....  | 23     |

|   |    |
|---|----|
| Cuadro 6. Coeficientes de correlación entre fracciones de fósforo del suelo, para las enmiendas asociadas con P mineral, para el período de junio/95 hasta junio/96. ....           | 25 |
| Cuadro 7. Coeficientes de correlación entre fracciones de fósforo del suelo, para las enmiendas sin adición de P mineral, para el periodo de junio/95 hasta junio/96. ....          | 25 |
| Cuadro 8. Coeficientes de correlación entre fracciones de fósforo del suelo, para el tratamiento Control con adición de P mineral, para el periodo de junio/95 hasta junio/96. .... | 25 |
| Cuadro 9. Contenido de P en las fracciones, P Total y rendimiento del maíz y del frijol. ....   | 27 |
| Cuadro 10. Balance del P aportado por los tratamientos y el P extraído por los cultivos de frijol y maíz durante 13 años. CATIE, Turrialba, Costa Rica. 1996. ....                  | 28 |

## LISTA DE FIGURAS

| FIGURAS  | PAGINA |
|--|--------|
| Figura 1. Promedio mensual de precipitación y temperatura en CATIE, Turrialba, Costa Rica, para el período de junio/1995 hasta junio/1996..... | 11     |
| Figura 2. Diagrama del fraccionamiento secuencial de P del suelo, modificado de Hedley <i>et al</i> (1982).....                                | 18     |

## LISTA DE ANEXOS

| ANEXOS   | PAGINA |
|--|--------|
| Anexo 1. Características químicas del suelo de los tratamientos evaluados (profundidad 0 - 20 cm). "La Montaña", Turrialba, Costa Rica, 1996. ....   | 41     |
| Anexo 2. Metodología para la determinación de las fracciones de fósforo del suelo .....  | 42     |
| Anexo 3. Metodología para la determinación del P Total de las muestras de suelo .....  | 46     |
| Anexo 4. Análisis de varianza para siete fracciones de P y P Total en un diseño de parcela subdividida en el espacio y en el tiempo, para los factores tipo de enmienda orgánica (Tratamiento), profundidad (Profundidad) y época de muestreo (Epoca)..... | 47     |

MACÉDO, J.L.V. 1996. Efecto de enmiendas orgánicas sobre las formas y la disponibilidad de fósforo en un suelo Inceptisol de origen volcánico. Tesis (M. Sc.), Turrialba, Costa Rica, CATIE. 63 p.

Palabras Claves : Fraccionamiento de fósforo, fósforo orgánico, fósforo inorgánico, fósforo microbial, fósforo total, enmiendas orgánicas, cultivo en callejones.

## RESUMEN

El presente trabajo se desarrolló en la Finca Experimental "La Montaña" del CATIE, Turrialba, Costa Rica, desde junio de 1995 hasta junio de 1996. El objetivo de este estudio fue evaluar el efecto de la aplicación de enmiendas orgánicas sobre las formas y la disponibilidad de fósforo en un suelo Inceptisol cultivado durante 13 años, con una rotación maíz-frijol.

Se empleó un diseño de bloques completos al azar con parcelas subdivididas en el espacio y el tiempo, con seis tratamientos y tres repeticiones. Los tratamientos evaluados fueron : dos sistemas tratados con estiércol de ganado (uno fertilizado con fósforo y otro no fertilizado); dos sistemas tratados con "mulch" de poró (*Erythrina poeppigiana*) con material de poda procedente de árboles fuera del sitio experimental (uno fertilizado con fósforo y otro no fertilizado); un sistema de cultivo en callejones con poró fertilizado con fósforo y un testigo donde no se aplicaron enmiendas orgánicas y que fue fertilizado con fósforo. En cada tratamiento se hizo tres muestreos de suelo a tres profundidades.

Para el fraccionamiento del fósforo, se utilizó una versión modificada de la metodología de Hedley que permite extraer secuencialmente desde las formas más disponibles hasta las formas más estables de fósforo del suelo.

Los resultados indicaron que la mayor parte del fósforo en sistemas tratados con enmiendas orgánicas se concentra en los primeros 10 cm de la capa superficial del suelo.

Los sistemas tratados con estiércol de ganado fueron los que presentaron los mayores contenidos de fósforo en las fracciones, destacándose el fertilizado con fósforo. La práctica de agregar abono fosfatado a las enmiendas orgánicas proporcionó mayores contenidos de fósforo en las fracciones del suelo. Para mantener un nivel adecuado de fósforo en el suelo y garantizar una buena producción de los cultivos asociados a largo plazo, el sistema de cultivo en callejones con poró, requiere de aplicación de abono fosfatado.

Las fracciones orgánicas e inorgánicas más estables, representaron una importante fuente de fósforo en los sistemas tratados con enmiendas orgánicas; fundamentalmente en aquellos que no están asociados a fertilización fosfatada. En este estudio la fracción orgánica extraída con bicarbonato de sodio ( $\text{NaHCO}_3$ ) y la fracción residual, fueron las que más variaron sus contenidos en fósforo. En el intervalo de tiempo que se cultivó el maíz, estas dos fracciones se comportaron como "depósitos" para el fósforo aportado no aprovechado por el cultivo. En el período que se cultivó el frijol, estas mismas fracciones se comportaron como "fuentes" de fósforo disponible al cultivo.

Basado en los resultados obtenidos se concluye que el empleo de enmiendas orgánicas se puede convertir en una estrategia para mejorar la disponibilidad de fósforo en aquellos sistemas de producción agrícola tradicionales o agroforestales, establecidos en suelos con alto poder de fijación. La mineralización del fósforo orgánico de la enmienda al aumentar el contenido de fósforo de las fracciones más lábiles del suelo, permite que este elemento esté disponible en el corto plazo; mientras, que el fósforo orgánico no mineralizado, que se incorpora a las fracciones orgánicas más estables, provee fósforo a largo plazo.

MACEDO, J.L.V. 1996. Effect of organic amendments on phosphorus forms and availability in a volcanic origin Inceptisol soil. Thesis (M.Sc.), Turrialba, Costa Rica, CATIE. 62 p.

Key words : phosphorus fractioning, organic phosphorus, inorganic phosphorus, microbial phosphorus, total phosphorus, organic amendments, alley cropping.

### SUMMARY

This research was conducted at CATIE's Experimental Farm "La Montaña", located in Turrialba, Costa Rica from June, 1995 to June, 1996. The purpose of this study was to evaluate the effect of applying organic amendments to different forms and availability of phosphorus on an Inceptisol soil cultivated for 13 years with a maize-bean rotation.

A complete random block design was employed using subdivided plots in time and space, six treatments and three repetitions. The treatments evaluated were : two systems treated with livestock manure (one fertilized with phosphorus and other without fertilizing); two systems treated with *Erythrina poeppigiana* mulch coming from pruned material of trees outside the experimental site (one fertilized with phosphorus and other without fertilization); an alley cropping system with *Erythrina poeppigiana* fertilized with phosphorus and a control without organic amendments but with phosphorus fertilization. Three soil samples were conducted for each treatment at three depths (0 - 5 cm, 5 - 10 cm y 0 - 20 cm).

For phosphorus fractioning, a modified version of Hedley's methodology which allows a sequential extraction of phosphorus from the more available to the more stable forms found in soils was utilized.

The results of this research indicated that the highest amount of phosphorus in the systems treated with organic amendments was found in the first 10 cm of superficial soil.

The systems treated with livestock's manure showed the highest phosphorus in the fractions, outstanding the one fertilized with phosphorus. The practice of associating phosphatized fertilizing with the organic amendments gave higher phosphorus contents to soil fractions. In order to keep an adequate phosphorus level in the soil and to guarantee a good long term production of the crops associated, the alley cropping system with *Erythrina poeppigiana* should be treated with phosphatized fertilizing.

The more stable organic and organic fractions represent an important phosphorus source for the systems treated with organic amendments, especially those which were not associated to phosphatized fertilizing. In this study, the organic fraction extracted with sodium bicarbonate ( $\text{NaHCO}_3$ ) and the residual fraction, showed the highest variation regarding their phosphorus contents. During the time that maize was cultivated, these two fractions behaved as "sink" of the phosphorus not utilized by the crop. During the period of beans culture, these same fractions acted as available "source" of phosphorus to the crop.

Based on the results obtained, it can be concluded that the use of organic amendments can become an strategy to improve phosphorus availability for traditional or agroforestry production systems established in soils with high fixation potencial. As the amendment's organic phosphorus mineralization increases the phosphorus content of soil's more labile fractions, this element is available in a short term; while non-mineralized organic phosphorus, incorporated to more stable organic fractions provides phosphorus after a long time.

## 1. INTRODUCCION

El fósforo (P) es uno de los principales nutrimentos que limitan la producción de los cultivos (Sánchez, 1987; Tiessen, 1992). En los suelos tropicales, la "fijación" de P con formas de aluminio, hierro y/o alófanas, disminuye su disponibilidad.

El conocimiento de la naturaleza, proporción y distribución de las fracciones de P, es fundamental para estimar la disponibilidad de este elemento para las plantas. Según Olsen y Khasawnew (1980), en el suelo existen básicamente dos formas de P : El fósforo orgánico ( $P_o$ ) que es el asociado a la materia orgánica y el fósforo inorgánico ( $P_i$ ) que es el asociado a la fase sólida inorgánica del suelo. Ambas formas también pueden estar presentes en la solución del suelo (Frossard *et al*, 1989). Aunque las plantas absorben el  $P_i$ , la importancia del  $P_o$  como un reservorio para el  $P_i$  a la planta ha sido bien documentado (Tate, 1984 ; Beck y Sánchez, 1994).

Varios estudios experimentales (Blair y Boland, 1978 ; Tiessen *et al*, 1984; Beck y Sánchez, 1994) y de modelación (Cole *et al*, 1977) han demostrado que una proporción significativa del fósforo requerido por el cultivo proviene de la fracción orgánica. En suelos de las regiones tropicales, esta forma de fósforo usualmente corresponde del 25 al 80% del fósforo total (Anderson, 1980). Por lo tanto, prácticas agrícolas que garanticen el mantenimiento o aumento de la materia orgánica del suelo (como por ejemplo el cultivo en callejones con árboles leguminosas o el empleo de enmiendas orgánicas) pueden mejorar la disponibilidad de fósforo en suelos con alta capacidad de fijación (Sánchez, 1987; Tiessen, 1992).

Algunos métodos tradicionales de determinación de fósforo del suelo, evalúan el  $P_i$  disponible a las plantas, pero ignoran las formas de  $P_o$  y  $P_i$  menos disponibles. En los sistemas agrícolas tradicionales de las regiones tropicales, donde el empleo de abono fosfatado es mínimo o casi nulo, estas fuentes menos disponibles, constituyen una fuente potencial de fósforo a las plantas (Beck y Sánchez, 1994). El método de fraccionamiento de fósforo del suelo desarrollado recientemente por Hedley *et al* (1982), permite relacionar el fósforo de fracciones inorgánicas y

orgánicas con aquellas absorbidas por los cultivos. Esta metodología separa fracciones de fósforo que varían en su grado de disponibilidad a la planta.

El objetivo del presente estudio fue evaluar el efecto de la aplicación de enmiendas orgánicas sobre las formas y la disponibilidad de fósforo en un suelo Inceptisol cultivado durante 13 años, con una rotación maíz-frijol.

Para cumplir con el objetivo general, se definieron los siguientes objetivos específicos :

- a) Determinar la enmienda que suministra la mayor cantidad de fósforo al suelo.
- b) Evaluar el efecto de las enmiendas orgánicas solas y asociadas a fertilización fosfatada sobre el contenido de las fracciones de fósforo del suelo;
- c) Cuantificar el contenido de las fracciones de fósforo del suelo a diferentes profundidades;
- d) Evaluar el efecto de la rotación maíz-frijol sobre el contenido de fósforo del suelo, en sistemas tratados con enmiendas orgánicas;
- e) Relacionar el contenido de fósforo del suelo con los rendimientos de los cultivos;
- f) Evaluar la factibilidad de emplear el método de fraccionamiento para estudiar el fósforo del suelo de sistemas tratados con enmiendas orgánicas.

Las hipótesis relacionadas con los objetivos específicos fueron:

- a) Los sistemas tratados con diferentes enmiendas orgánicas presentarán el mismo contenido de fósforo en el suelo;
- b) El contenido de fósforo de las fracciones no se incrementará con la asociación de abono fosfatado a las enmiendas orgánicas;
- c) El contenido de fósforo de las fracciones no cambiará con la profundidad;
- d) El contenido de fósforo del suelo no variará con la explotación de cultivos;
- e) El fósforo aportado al suelo proveniente de las enmiendas orgánicas, no ejercen ninguna influencia en los rendimientos de los cultivos;
- f) El método de fraccionamiento no es adecuado para estudiar el fósforo del suelo de sistemas tratados con enmiendas orgánicas.

## 2. REVISION BIBLIOGRAFICA

### 2.1. Formas y contenido de fósforo en suelos tropicales.

#### 2.1.1. Fósforo total ( $P_T$ )

El contenido total de fósforo ( $P_T$ ) en el suelo es relativamente bajo en comparación con otros macronutrientes. En suelos de áreas templadas el contenido de  $P_T$  varía entre 200 y 800 mg/kg, con un valor promedio de 500 mg/kg (Jackson, 1964). Los contenidos de  $P_T$  en los suelos de áreas tropicales varía desde 18 mg P/kg en Oxisols y Ultisols de Venezuela (Westin y Brito, 1969) hasta 3300 mg P/kg, en el caso de los suelos derivados de cenizas volcánicas de América Central (Fassbender *et al*, 1968). Esta gran variabilidad se debe a la heterogeneidad de las rocas parentales, al desarrollo de los suelos y a otras condiciones edafológicas (Fassbender y Bornemisza, 1994).

La cantidad de  $P_T$  en los suelos de áreas tropicales parece estar ligado al contenido de materia orgánica, y a su evolución pedológica. Al aumentar la concentración de la materia orgánica y de los fosfatos orgánicos en los suelos, se obtiene una mayor cantidad de este elemento (Fassbender y Bornemisza, 1994).

#### 2.1.2. Fósforo orgánico ( $P_o$ )

El contenido de fósforo orgánico ( $P_o$ ) en el suelo varía considerablemente. Esta fracción puede constituir desde 20 hasta 80 % del fósforo total de la capa superficial del suelo, aunque han sido reportados valores extremos, tales como un 4% en suelos podzólicos y un 90 % en humus alpinos (Williams y Steinbergs, 1958).

La gran mayoría de las formas de  $P_o$  que ocurren en el suelo son derivados de los ésteres del ácido ortofosfórico (Anderson, 1980). Según Roberts y Weaver (1973), los principales grupos son : los fosfolípidos; los ácidos nucleicos y los fosfatos de inositol. Estos últimos, comprenden la forma más abundante y pueden representar hasta el 60% del  $P_o$  total del suelo. Los fosfolípidos y los ácidos nucleicos contribuyen solamente con un 5 - 10% y <1%, respectivamente. Hay

evidencias de que los polifosfatos, las fosfoproteínas y algunos azúcares que contienen P, también pueden ser encontrados en el suelo.

Fassbender *et al* (1968), verificaron que en los suelos de América Central, donde predominaban fosfatos de aluminio y hierro, la fracción orgánica contribuía con 25% del total, mientras que en suelos con predominancia de fosfatos de calcio, ésta alcanzaba un promedio de 41%. En el 74% de los suelos de la Amazonía de Brasil, el 20% del  $P_T$  estaba en la forma orgánica (Vieira y Bornemisza, 1968). Se ha encontrado que los fosfatos orgánicos constituyen una parte importante del  $P_T$  en suelos de las regiones cafetaleras de Colombia (López Arana, 1960).

Altos contenidos de  $P_o$  están asociados con altos contenidos de materia orgánica en el suelo. Según Tiessen (1992), además de los procesos inorgánicos, el ciclo de la materia orgánica constantemente libera P a la solución del suelo por la mineralización del  $P_o$ . Chater y Mattingly (1979), determinaron que en un suelo agrícola británico, la tasa anual de mineralización del  $P_o$  liberó  $P_i$  en cantidad equivalente a 1/3 del promedio de P removido por el cultivo. Según Dalal (1977), la tasa de mineralización del  $P_o$  puede ser influenciada por una serie de factores, entre ellos el clima y las condiciones del suelo. Además, los compuestos orgánicos de P poseen diferentes tasas de mineralización.

Otros factores que afectan el contenido de  $P_o$  en el suelo son : el drenaje (suelos mal drenados contienen menos  $P_o$  que suelos bien drenados); el pH del suelo (el contenido de  $P_o$  generalmente aumenta con la disminución del pH del suelo); el tipo de cultivo y el contenido de  $P_i$  del material parental (Dalal, 1977). En los últimos años, debido a la gran importancia del  $P_o$  como fuente potencial de  $P_i$ , se han intensificado los estudios de esta forma de P en los suelos de las regiones tropicales.

### 2.1.3. Fósforo inorgánico ( $P_i$ )

El fósforo inorgánico ( $P_i$ ) del suelo está formado por dos grupos de compuestos : los que tienen en su constitución calcio y los que tienen hierro y aluminio. En el primer grupo se tiene una secuencia de compuestos que van desde el fosfato monocálcico  $[Ca (H_2PO_4)_2]$  más soluble, hasta la fluorapatita

[Ca<sub>10</sub>Fe<sub>2</sub>(PO<sub>4</sub>)<sub>6</sub>] insoluble. Estas formas son comunes en suelos neutros o alcalinos (Raij, 1991). En los fosfatos del segundo grupo se destacan el fosfato aluminico o variscita (AlPO<sub>4</sub>·2H<sub>2</sub>O), el fosfato férrico o vivianita [(Fe<sub>3</sub>(PO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>·8H<sub>2</sub>O)], el fosfato ferroso o estrengita (FePO<sub>4</sub>·2H<sub>2</sub>O) y el fosfato de hierro y aluminio en combinación isomórfica o barrandita. Estos últimos se caracterizan por ser bastante inestables e insolubles y se presentan en suelos ácidos, con predominancia de caolinita y óxidos de hierro y aluminio (Cole y Jackson, 1951).

Al respecto, Fassbender *et al* (1968), reportaron la ocurrencia de dos formas de P<sub>i</sub> en suelos de América Central: uno con predominancia de fosfato de calcio (80/110 muestras) y el otro donde se destacan las formas aluminicas y férricas (30/110 muestras). Vieira y Bornemisza (1968), al determinar los fosfatos inorgánicos en 12 perfiles de oxisols altamente intemperizados de la Amazonía de Brasil, verificaron que la mayor parte de estos se encontraban en formas insolubles poco aprovechables (ocluídas).

La proporción relativa de los compuestos inorgánicos del P en el suelo es condicionada por el pH y por el tipo y cantidad de minerales existentes en la fracción arcilla (Raij, 1991). Debido a que las plantas absorben P de la fracción inorgánica del suelo, esta forma ha recibido la mayor atención por parte de los investigadores.

#### 2.1.4. Fósforo microbiana (P<sub>m</sub>)

La biomasa microbiana, definida como la parte viva de la materia orgánica del suelo, excluyendo las raíces de las plantas y los organismos mayores de 5 x 10<sup>-15</sup> m<sup>3</sup> (Brookes *et al*, 1982), desempeña un papel muy importante en las reacciones de mineralización-inmovilización de P en el suelo (McLaughlin *et al*, 1988; Singh *et al*, 1989; Lee *et al*, 1990). El P<sub>m</sub> comprende aproximadamente el 2 - 3% del carbono orgánico total y constituye una fracción relativamente lábil de la materia orgánica del suelo. Un estudio llevado a cabo en un Inceptisol de Costa Rica, López (1996), encontró que entre el 2.9 al 5 % del P<sub>Total</sub> correspondía al P<sub>m</sub>.

Hasta inicios de la década del 80, el P<sub>m</sub> era estimado indirectamente a partir de la biomasa microbiana, utilizándose para ello valores reportados en la literatura

con el contenido de P de microorganismos cultivados en laboratorio. Sin embargo, el  $P_m$  estimado indirectamente, puede variar grandemente debido a la edad de los microorganismos y al contenido de P en el medio en el cual se desarrollaban (Tate, 1984). Concientes de estos problemas, Brookes *et al* (1982) y Hedley y Stewart (1982), desarrollaron dos métodos de determinación directa del contenido de P en la biomasa microbiana del suelo, los cuales permiten evaluar la importancia del  $P_m$  en el reciclaje de P y en la nutrición de las plantas tanto en ecosistemas naturales y como en agroecosistemas.

## 2.2. Extracción secuencial de fósforo del suelo

Determinar una reserva de P en el suelo que sea potencialmente disponible a la planta no es sencillo, puesto que el P en la solución del suelo reacciona muy rápidamente con la fase mineral del suelo. Esto condujo al desarrollo de técnicas de fraccionamiento que determinaran primeramente, el P lábil y, después, las formas más estables (Tiesen, 1992).

El primer método de extracción secuencial de P del suelo fue desarrollado por Chang y Jackson (1957). El método consistía en separar las formas químicas identificables de  $P_i$ : fosfato de calcio, fosfato de aluminio, fosfato de hierro, fosfato de hierro soluble en reductores\* (costras de óxido de hierro) y fosfato de hierro ocluido. El método estaba basado en la solubilidad selectiva de los fosfatos ante varios agentes extractantes, pero debido a los problemas de re-precipitación del P extraído y la igualdad en la solubilidad de los fosfatos de hierro y aluminio, el método tuvo un empleo limitado y fue modificado (Williams *et al*, 1967).

Actualmente, una metodología que está siendo ampliamente aceptada para el análisis de las diferentes fracciones de P en el suelo, es la propuesta por Hedley *et al* (1982). Este método permite evaluar las formas lábiles, moderadamente lábiles y recalcitrantes de P, tanto inorgánico como orgánico. El método consiste en una extracción secuencial de las distintas formas de dicho elemento con resinas

---

\* Según Sánchez (1981) las formas solubles en reductores son aquellas que están cubiertas por un revestimiento inerte que pueden disolverse parcial o totalmente bajo condiciones anaeóbicas del suelo.

intercambiadoras de aniones, bicarbonato de sodio, hidróxido de sodio, ácido clorídrico y una extracción final con una mezcla de ácido sulfúrico y agua oxigenada.

### 2.3. Sistema de cultivo en callejones y disponibilidad de fósforo

La restauración y mantenimiento de la fertilidad del suelo es una necesidad permanente de la mayoría de los sistemas de cultivo desarrollados en la agricultura y esta necesidad se hace más evidente en los trópicos, donde muchos suelos poseen bajos contenidos de nutrimentos así como de materia orgánica (Gutteridge y Shelton, 1994). Los árboles pueden hacer una contribución significativa para el mantenimiento de la fertilidad del suelo y se usan para este propósito en los sistemas agroforestales. Tal es el caso del **sistema de cultivo en callejones** (alley cropping), donde especies perennes leñosas (preferiblemente leguminosas de rápido crecimiento) son establecidas en hileras espaciadas y posteriormente le son asociados cultivos alimenticios. Los árboles son podados y los residuos de la poda son aplicados en el suelo como abono verde. Estos residuos de las podas proveen nutrimentos y materia orgánica, que mejoran la fertilidad del suelo, facilitan la retención de humedad y la actividad biológica del suelo (Kang *et al*, 1990).

La aplicación de residuos vegetales disminuye la fijación de P, y por tanto, incrementa su disponibilidad (Li *et al*, 1990). Se ha observado que la liberación de P a partir de materiales orgánicos se hace máxima a los 36 días de la aplicación (Blair y Boland, 1978), pero depende mucho de la composición química del material y de las condiciones climáticas prevalcientes en la región (Palm *et al*, 1989).

La humedad y la temperatura son los dos factores ambientales que más influyen en la tasa de descomposición del material vegetal, y por ende, de la liberación de P al suelo (Dalal, 1977). La mineralización de P<sub>o</sub> está estrechamente relacionada con la tasa de descomposición de la materia orgánica en el suelo (Li *et al*, 1990). Se considera que períodos alternos de sequía y humedad favorecen la liberación de este nutrimento (Marumoto *et al*, 1982 ; Amato *et al*, 1984). A su vez, Fuller *et al* (1956), consideran que la madurez del material vegetal, la parte y la cantidad de la planta aplicada así como el periodo de tiempo en que los materiales

orgánicos son incorporados al suelo, también tienen influencia en la mineralización de este elemento.

En suelos con bajo contenido de fósforo o con alta fijación de este elemento, los niveles de P para el crecimiento de los cultivos anuales son bajos (Palm *et al*, 1989; Szott *et al*, 1991). El P puede ser el elemento limitante en los cultivos en callejones que posean una alta demanda de este elemento, incluso más que en otros sistemas agroforestales, tales como plantaciones de sombra o huertos caseros, donde la remoción de P por los cultivos es menor (Kass, 1987).

Pocos intentos se han realizado para mejorar la disponibilidad de fósforo en los sistemas de cultivo en callejones y los resultados obtenidos no son muy consistentes. En un ensayo con arroz (*Oriza sativa*) y caupí (*Vigna unguiculata*) cultivados en callejones, en un suelo Typic Paleudult, con bajos niveles de aplicación de P (25 kg de P/ha/año) se obtuvieron, después de tres años, bajas respuestas en el rendimiento de los cultivos (Salazar, 1990).

Yamoah *et al* (1986), reportaron en un ensayo de maíz (*Zea mayz*) asociado con árboles y arbustos leguminosos en Nigeria, una disminución en el balance de P en el suelo en las parcelas control y en las parcelas asociadas con *Gliricidia sepium*; en cambio, se observó un incremento en el nivel de P del suelo en las parcelas con *Acacia angustissima* y *Flemingia congesta*. En otro experimento desarrollado en Nigeria, con maíz y *Leucaena leucocephala* no se reportaron diferencias (con relación al contenido de fósforo en el suelo), por efecto de los tratamientos aplicados, los cuales consistieron en combinar dosis de fertilización nitrogenada y remoción o retención de la poda (Kang *et al*, 1985). Onim *et al* (1990) reportaron aumentos de los niveles de P en el suelo y mejores rendimientos usando *Sesbania sesban* como abono verde.

Haggar *et al* (1991), encontraron que la absorción de P por los cultivos fue mayor bajo cultivo en callejones que en cultivo solo, y que el suministro de P a los cultivos en los callejones parece ser dependiente del P liberado y reciclado de los residuos de la poda.

## 2.4. Empleo de enmiendas orgánicas y disponibilidad de fósforo en el suelo.

La aplicación de materia orgánica se ha sugerido como una alternativa de manejo para aumentar la disponibilidad de P en suelos con alta capacidad de adsorción (Blair y Boland, 1978). Los organismos vivos que habitan en la materia orgánica, especialmente los hongos y las bacterias, solubilizan el  $P_i$  de los minerales (Kucey, 1983) y el P de compuestos orgánicos del suelo (Tate, 1984). Estudios realizados en condiciones de laboratorio (Struthers y Sieling, 1950; Dalton *et al*, 1952), demostraron que los ácidos orgánicos, liberados durante la descomposición de la materia orgánica, fueron responsables de la solubilización del fosfato ligado al hierro y al aluminio presentes, tanto en la solución como en los minerales de las arcillas. Los ácidos orgánicos también aumentan la solubilidad del P por competir con los fosfatos por los sitios de adsorción de los aniones en las arcillas (López-Hernández *et al*, 1984).

En suelos ácidos, el P soluble reacciona rápidamente con el hierro y el aluminio libres, formando compuestos que se precipitan fuera de la solución del suelo. Los aniones orgánicos, provenientes de la descomposición de la materia orgánica, forman quelatos con el hierro y el aluminio presentes en la solución del suelo. Estos aniones, al reducir la cantidad de hierro y aluminio que podrían reaccionar con los fosfatos, aumentan la disponibilidad de P (Traina *et al*, 1986).

Según Cerri y Moraes (1992), el efecto del  $P_i$  en la mineralización del  $P_o$  varía con las condiciones del suelo, clima y el cultivo que se está explotando. Enwozer (1966), demostró que la aplicación de  $P_i$  aumentó la tasa de mineralización del  $P_o$  en el suelo. Del mismo modo, Wier y Black (1968), reportaron que este aumento se debió a una mayor solubilización del  $P_o$ ; el  $P_i$  al competir con el  $P_o$  por los iones de hierro, aluminio y calcio hizo que una parte considerable del  $P_o$  se mantuviera en la solución del suelo, tornándose más susceptible a la mineralización. Dalton *et al* (1952), encontraron que la materia orgánica en forma de abono verde, incrementó la eficiencia de los fertilizantes fosforados aplicados, debido a que la materia orgánica redujo la fijación de P.

### 3. MATERIALES Y METODOS

#### 3.1. Caracterización del área experimental

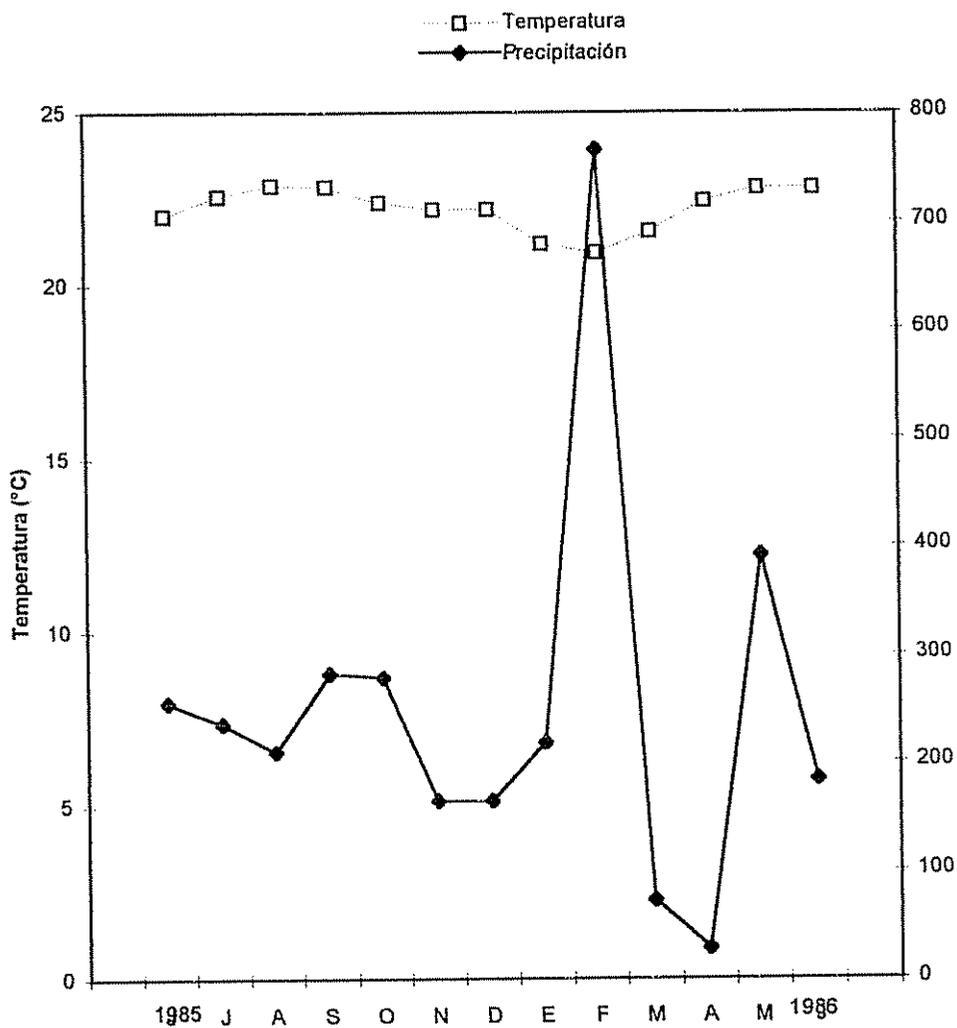
El estudio fue realizado en la Finca Experimental "La Montaña" del Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza, CATIE, en Turrialba, Costa Rica (9° 53' Latitud Norte y 83° 34' Longitud Oeste a 602 msnm). La zona de vida es clasificada como Bosque Húmedo Premontano (Holdridge, 1987).

El clima se caracteriza por lluvias distribuidas a lo largo de todo el año, con un período de mínima precipitación entre los meses de Marzo a Abril (Figura 1). En el período de estudio la temperatura promedio y la precipitación anual fueron de 22 °C y 3250 mm, respectivamente.

El suelo es un Inceptisol, sub-orden Tropepts, gran grupo Humitropepts, sub-grupo Typic Humitropepts y familia fina halloysitic isohipertérmico, derivado de depósitos aluviales de origen volcánico (Kass *et al*, 1989). En la capa 0 - 20 cm, el suelo posee 25% de arena, 34% de limo y 41% de arcilla. Al inicio del estudio, el suelo de los tratamientos evaluados presentaba, en promedio, un pH de 5.7; 5.8 % de materia orgánica; 0.26% de N; 24.4 mg P/kg y 4.74, 1.64 y 0.81 meq/100g de Ca, Mg y K, respectivamente (Anexo 1). Según Fassbender y Bornemisza (1994), el suelo del área de estudio se caracteriza por presentar una alta capacidad de adsorción de fósforo. La isoterma de adsorción<sup>1</sup> de P determinada por el método de Fox y Kamprath (1970), para este suelo, demostró que para aumentar la concentración de P en la solución al 0.2 mg/kg son necesarios 350 mg de P/kg (Paniagua, 1991).

---

<sup>1</sup> Según Fox y Kamprath (1970), una isoterma de adsorción es una curva que relaciona la cantidad de una sustancia retenida en una interfase con una concentración en equilibrio que se encuentra en contacto con esta interfase.



**Figura 1.** Promedio mensual de precipitación y temperatura en CATIE, Turrialba, Costa Rica, para el período de junio/1995 hasta junio/1996.

### 3.2. Tratamientos evaluados

En este estudio fueron evaluados los siguientes tratamientos :

**a) Testigo con aplicación de fósforo inorgánico (Control +P)**

Tratamiento sin aplicación de enmiendas orgánicas que durante diez años (1982 hasta 1992) recibió 38.4 kg de P/ha/año, como triple superfosfato.

**b) Mulch de poró sin adición de P inorgánico (Mulch -P)**

Este tratamiento consistió en la aplicación de ramas y hojas de poró (*Erythrina poeppigiana*) procedentes de árboles fuera del sitio experimental. En cada parcela se aplicaba 20 t de materia verde/ha/poda, una semana antes de sembrar el maíz y el frijol.

**c) Mulch de poró con adición de P inorgánico (Mulch +P)**

El tratamiento anterior (b), que durante diez años recibió una aplicación adicional de 38.4 kg de P/ha/año, como triple superfosfato.

**d) Callejon de poró con adición de P inorgánico (Callejón +P)**

Este tratamiento consistió en la aplicación de mulch de poró de árboles que fueron sembrados en el sitio experimental en 1982 a una distancia de 6,0 m entre las franjas y 3,0 m entre los árboles (555 árboles/ha). Una semana antes de sembrar el maíz y el frijol, se aplicaba sobre la superficie del suelo una cantidad promedio de 20 t de ramas verdes/ha/poda. Durante diez años, este tratamiento recibió una aplicación adicional de 38.4 kg de P/ha/año.

**e) Estiércol de ganado sin adición de P inorgánico (Estiércol -P)**

Consistió en la aplicación de 20 t de estiércol de ganado/ha/aplicación, una semana antes de sembrar el maíz y el frijol.

### **f) Estiércol de ganado con adición de P inorgánico (Estiércol +P)**

El mismo tratamiento anterior (e) que durante diez años recibió una aplicación adicional de 38.4 kg de P/ha/año, como triple superfosfato.

### **3.3. Muestreo de suelo para fraccionamiento del fósforo**

Para la evaluación de las formas de fósforo, se efectuaron tres muestreos de suelo durante un año (junio/95, diciembre/95 y junio/96), a tres profundidades (0 -5 cm, 5 - 10 cm y 0 - 20 cm). Los muestreos se realizaron 1 día antes de la aplicación de los tratamientos (Cuadro 1). En cada parcela, se tomaron 20 submuestras, las cuales se mezclaron y se homogenizaron para sacar una muestra representativa. Esta última fue secada al aire, tamizada en malla de 0.2 mm y almacenada en recipientes plásticos para el posterior análisis.

### **3.4. Cultivos asociados**

Con el interés de evaluar los cambios que se producían en las fracciones de P del suelo con motivo de la presencia y explotación de cultivos, se sembró maíz y frijol durante el período de estudio.

#### *3.4.1. Maíz*

El maíz fue sembrado en junio de 1995 a una densidad promedio de 45.000 plantas/ha, 10 días después que se hizo el primer muestreo de suelo (Cuadro 1). El cultivar utilizado fue el Tuxpeño Ciclo 7. En todas las parcelas el espaciamiento adoptado fue de 0.8 m x 0.5 m.

En octubre de 1995 se cosechó el maíz. El rendimiento fue medido con base en el área útil de cada parcela. Para el cálculo del rendimiento total por hectárea, se ajustó el peso a 14% de humedad.

Considerando que los residuos vegetales del maíz fueron aplicados en las parcelas como "mulch" y que no se tomaron muestras del mismo para determinar la producción de biomasa y su contenido en P, se utilizó los datos de madurez fisiológica de los años anteriores (1982 hasta 1994), para estimar el P recirculado por los residuos del maíz en los tratamientos evaluados.

### *3.4.2. Frijol*

El frijol fue sembrado en diciembre de 1995 a una densidad promedio de 90.000 plantas/ha, 10 días después que se hizo el segundo muestreo de suelo (Cuadro 1). El cultivar utilizado fue el Turrialba 4. El espaciamiento utilizado fue de 0.5 m x 0.25 m.

Para determinar la cantidad de nutrimentos exportados por el frijol, en el período de madurez fisiológica (Cuadro 1), se escogió al azar una hilera de 12 golpes del área útil de la parcela para medir la biomasa de hoja, tallo, raíces y vainas. Se tomó una submuestra de cada uno de estos componentes para determinar la materia seca y su contenido en P.

En marzo de 1995 se cosechó el frijol. El rendimiento fue medido con base al área útil de cada parcela. Para el cálculo del rendimiento total por hectárea, se ajustó el peso a 14% de humedad.

Finalmente, para obtener un análisis más consistente del efecto del fósforo aportado por las enmiendas sobre los rendimientos de los cultivos, se agregó los resultados de la producción del maíz y del frijol obtenidas en 1995 y 1996, respectivamente, con los resultados de las producciones de los años anteriores.

**Cuadro 1.** Cronograma de las actividades realizadas durante el periodo de estudio.

| <b>ACTIVIDAD</b>                               | <b>FECHA</b>   |
|--|----------------|
| 1º muestreo de suelo                           | 03 y 04/06/95  |
| Aplicación de los tratamientos en las parcelas | 05 al 07/06/95 |
| Siembra del maíz                               | 13 y 14/06/95  |
| Cosecha del maíz                               | 17/10/95       |
| 2º muestreo de suelo                           | 02 y 03/12/95  |
| Aplicación de los tratamientos en las parcelas | 04 al 07/12/95 |
| Siembra del frijol                             | 11 y 12/12/95  |
| Toma de datos - Madurez fisiológica del frijol | 20/02/96       |
| Cosecha del frijol                             | 14/03/96       |
| 3º muestreo de suelo                           | 01 y 02/06/96  |
| Análisis de laboratorio                        | 08/96 al 10/96 |

### 3.4. Unidad experimental, Diseño experimental y modelo matemático

El área total de la unidad experimental fue de 54 m<sup>2</sup> (6m X 9m). El área útil de las parcelas sin árboles fue de 5m X 7m y de las parcelas con árboles de 4m X 7m. Las parcelas con poró tenían un total de 4 árboles/parcela útil.

El diseño experimental utilizado fue el de bloques al azar con parcelas divididas en el espacio y el tiempo (Steel y Torrie, 1988), con 6 tratamientos y 3 repeticiones. La parcela principal correspondió a los tratamientos (Factor A), la subparcela a las profundidades de muestreo (Factor B), ambos factores se analizaron sin aleatorización en 3 épocas de muestreo (Factor C). El modelo matemático empleado para el análisis de los datos fue el siguiente:

$$Y_{ijkm} = \mu + B_i + T_j + \varepsilon_{ij} + P_k + TP_{jk} + \varepsilon_{ijk} + E_m + TE_{jm} + PE_{km} + TPE_{jkm} + \varepsilon_{ijkm}$$

donde,

- $Y_{ijk}$  = Variable dependiente
- $\mu$  = Media general de la población
- $B_i$  = Efecto del bloque ( $i = 1,2,3$ )
- $T_j$  = Efecto de los tratamientos ( $j = 1,2,\dots,6$ )
- $\varepsilon_{ij}$  = Error en las parcelas principales
- $P_k$  = Efecto de las profundidades de muestreo ( $k = 1,2,3$ )
- $TP_{jk}$  = Efecto de la interacción tratamientos X profundidad de muestreo
- $\varepsilon_{ijk}$  = Error en las subparcelas
- $E_m$  = Efecto de las épocas de muestreo ( $m = 1,2,3$ )
- $TE_{jm}$  = Interacción tratamientos X época de muestreo
- $PE_{km}$  = Interacción profundidades de muestreo X épocas de muestreo
- $TPE_{jkm}$  = Interacción tratamientos X profundidades de muestreo X épocas de muestreo
- $\varepsilon_{ijkm}$  = Error en la sub-subparcela

### 3.5. Fraccionamiento de fósforo de las muestras de suelo

Se utilizó el método propuesto por Hedley *et al* (1982), realizándole algunas modificaciones que lo hicieron más conveniente a las condiciones del suelo estudiado (Figura 2). En esta metodología, los extractores son seleccionados de tal manera que primeramente se extraen las formas relativamente lábiles de  $P_i$  y  $P_o$ , después las moderadamente lábiles y finalmente las formas más estables de P del suelo. Con las resinas intercambiadoras de aniones se extraen las formas de  $P_i$  más disponibles biológicamente (Abrams y Jarrel, 1992); con el bicarbonato de sodio 0,5 M (a pH de 8.5) las formas lábiles adsorbidas débilmente en la superficie de los sesquióxidos, los compuestos cristalinos de fósforo o carbonatos, y parte del  $P_m$

(Bowman y Cole, 1978); con el hidróxido de sodio 0,1 M, se extraen las formas moderadamente lábiles de  $P_i$  que están más fuertemente retenidas en la superficie de los compuestos de hierro y aluminio amorfos o poco cristalinos (McLaughlin *et al*, 1977). La metodología original propuesta por Hedley *et al* (1982), se utiliza una segunda extracción con hidróxido de sodio 0,1 M después de ultrasonificar las muestras del suelo. Sin embargo, en un estudio realizado anteriormente con este tipo de suelo (Paniagua, 1991), se observó que menos del 5% del  $P_T$  del suelo fue extraído con bicarbonato de sodio después de sonificado; por este motivo se eliminó esta etapa y se procedió con la extracción final con el ácido clorídrico 1 N. Según Williams *et al* (1971), con este reactivo se extraen las formas de  $P_i$  más fuertemente retenidas en la superficie de los óxidos de hierro y de aluminio y aquellos retenidos internamente en óxidos cristalinos.

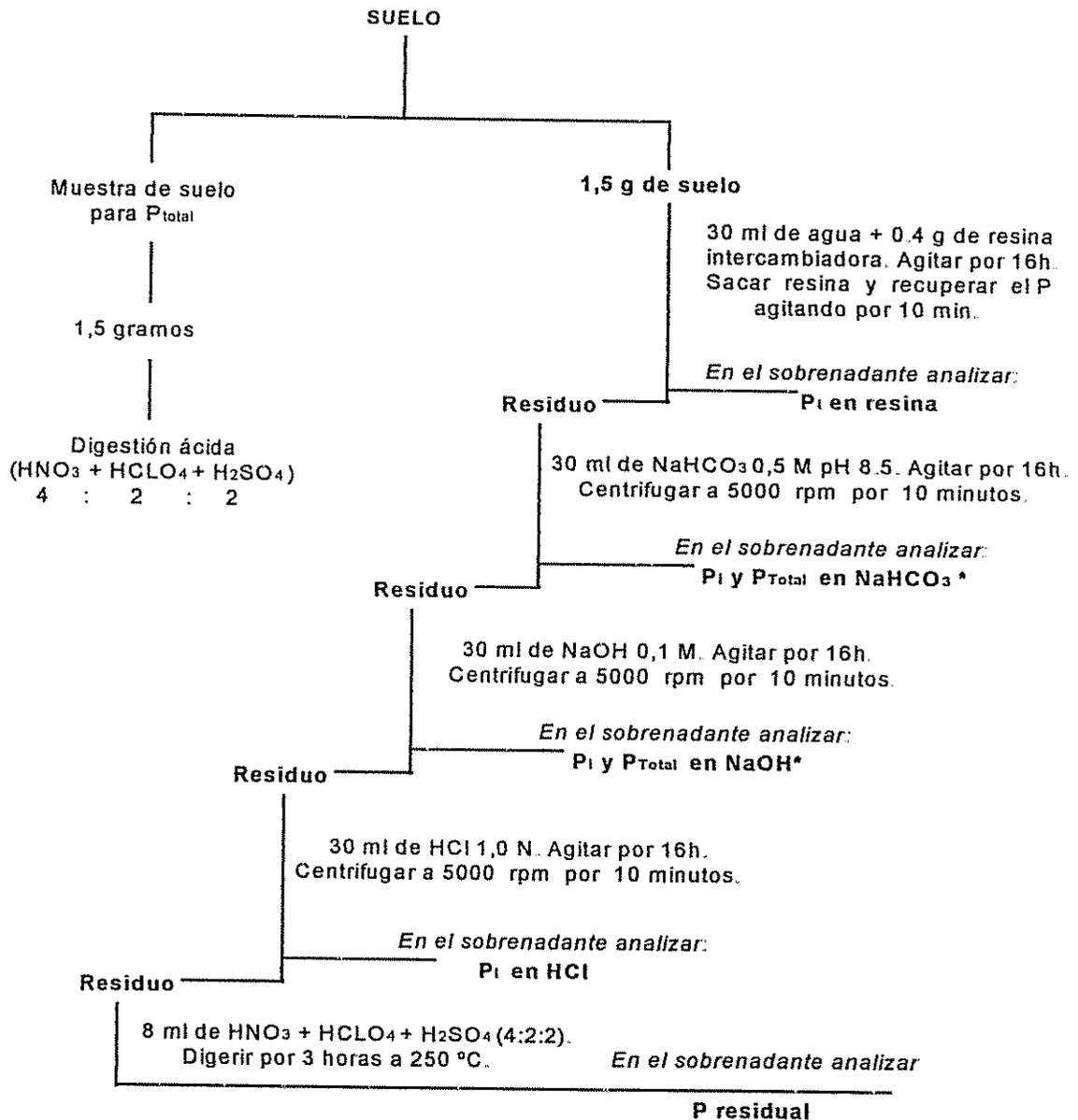
Las formas orgánicas de P son extraídas con bicarbonato de sodio 0,5 M (pH 8.5) e hidróxido de sodio 0,1 M. Con el primer reactivo, se extraen formas orgánicas fácilmente mineralizables (Bowman y Cole, 1978) y con el segundo, las formas más estables, pero menos mineralizables (MacLaughlin *et al*, 1977). Finalmente, el fósforo residual ( $P_{residual}$ ), relativamente insoluble, constituido por una mezcla de  $P_i$  cubierto con sesquióxidos (ocluído), fósforo inorgánico asociado a otros minerales y formas de  $P_o$  químicamente más estables, fue extraído por digestión con una mezcla de ácido sulfúrico, ácido perclórico y ácido nítrico.

El fósforo fue determinado colorimétricamente por el método de Murphy y Riley (1962). En nuestro caso, la longitud de onda que se utilizó para efectuar la lectura de P en los diferentes extractos fue de 830 nm.

### **3.6. Determinación del $P_{Total}$ en las muestras de suelo**

Con el objetivo de evaluar la eficiencia del método de fraccionamiento en extraer todo el P del suelo, se procedió a la determinación del contenido de  $P_T$  de todas las muestras que fueron sometidas al fraccionamiento. La metodología adoptada se describe en el Anexo 3.

Figura 2. Diagrama del fraccionamiento secuencial de P del suelo, modificado de Hedley *et al* (1982).



\*  $P_o$  es calculado indirectamente :  $P_o = P_{Total} - P_i$

## 4. RESULTADOS Y DISCUSIONES

### 4.1. Efecto de los tratamientos sobre el contenido de P en las fracciones

El análisis estadístico indicó que a excepción del  $P_{\text{residual}}$ , el contenido de P en todas las fracciones varió con los tratamientos (Anexo 4).

En general, los tratamientos con aplicación de estiércol de ganado fueron los que presentaron los mayores contenidos de P en las fracciones extraídas, principalmente en las fracciones inorgánicas más disponibles ( $P_i$  resina y  $P_i$   $\text{NaHCO}_3$ ). Cuando se combinó esta enmienda con P mineral, los contenidos de P en todas las fracciones aumentaron (Cuadro 2). Cantarella *et al* (1992), consideran que la mineralización previa que sufre el P de los tejidos vegetales durante el proceso de digestión de los animales (principalmente herbívoros), hace que gran parte del P proveniente de sus heces se encuentre en forma inorgánica; a su vez el material más fibroso presente en el estiércol, también libera una cantidad considerable de P en la medida que este se descompone. Zech *et al* (1990) sugieren que las enmiendas orgánicas de origen animal al poseer en su fracción orgánica compuestos aromáticos de P, son más estables, en el suministro de P al suelo, que los residuos vegetales.

Los otros dos tratamientos que también realizan un aporte externo de nutrimentos al sistema (Mulch de poró con y sin adición de P mineral), presentaron niveles intermedios de P en todas las fracciones, al ser comparados con los tratamientos Control + P y Callejón de poró + P. Al igual que en el tratamiento con estiércol, esta enmienda al estar asociada con P mineral, tiende a presentar mayores contenidos de P en sus fracciones (Cuadro 2).

**Cuadro 2.** Contenido de fósforo en las fracciones y P Total de las muestras de suelo de los tratamientos evaluados, para el periodo de junio/95 hasta junio/96. Profundidad 0 -20 cm. Valores en mg de P/kg de suelo.

| FRACCIONES<br>DE FOSFORO               | TRATAMIENTOS* |              |          |          |             |            |
|--|---------------|--------------|----------|----------|-------------|------------|
|  | Estiércol +P  | Estiércol -P | Mulch +P | Mulch -P | Callejón +P | Control +P |
| <b>P<sub>i</sub> resina</b>            | 19,5 a        | 17,8 a       | 9,6 b    | 8,3 b    | 4,8 b       | 5,1 b      |
| <b>P<sub>i</sub> NaHCO<sub>3</sub></b> | 37,3 a        | 28,7 ab      | 24,2 b   | 13,1 c   | 21,4 b      | 21,6 b     |
| <b>P<sub>i</sub> NaOH</b>              | 457,1 a       | 385,7 b      | 364,3 b  | 266,9 c  | 366,2 b     | 365,9 b    |
| <b>P<sub>i</sub> HCl</b>               | 28,7 a        | 19,8 b       | 13,4 b   | 12,8 b   | 13,7 b      | 12,7 b     |
| <b>P<sub>o</sub> NaHCO<sub>3</sub></b> | 69,4 a        | 57,5 b       | 59,2 b   | 51,9 c   | 65,8 a      | 55,6 b     |
| <b>P<sub>o</sub> NaOH</b>              | 568,0 ab      | 548,5 b      | 552,8 ab | 497,2 c  | 604,6 a     | 577,9 ab   |
| <b>P residual</b>                      | 917,7 a       | 921,4 a      | 919,5 a  | 872,9 a  | 916,5 a     | 964,7 a    |
| <b>P Total</b>                         | 2097,7 a      | 1979,4 a     | 1943,0 a | 1723,1 b | 1993,0 a    | 2003,5 a   |

\* Medias seguidas por la misma letra en la horizontal, son estadísticamente iguales al nivel de 5% de probabilidad por la prueba de Duncan.

Se observa que en el tratamiento Callejón + P, los niveles de P en las fracciones orgánicas (P<sub>o</sub> NaHCO<sub>3</sub> y P<sub>o</sub> NaOH), fueron semejantes al tratamiento estiércol +P y superiores a los demás tratamientos. Esto indica que al aplicar fuentes orgánicas con bajo contenido de P al suelo, los microorganismos allí presentes se multiplican e inmovilizan el P de estos materiales, provocando un aumento en el contenido de P de la fracción orgánica y reduciendo el P<sub>i</sub> disponible a la planta (Anderson, 1980).

Los mayores contenidos de P en la fracción residual se presentan en el tratamiento Control +P. En este sentido, Barrow (1980), señaló que en el tratamiento con solo aplicación de abono fosfatado, el P mineral que no es aprovechado por las plantas, se acumula en la fracción residual.

#### 4.2. Efecto de la profundidad de muestreo sobre el contenido de P en las fracciones

El análisis estadístico de las profundidades de muestreo estudiadas fue altamente significativo ( $p < 0.001$ ; Anexo 4). Como se puede observar, el contenido de P en las fracciones y el  $P_{\text{Total}}$  disminuyen con el aumento de la profundidad (Cuadro 3). De modo general, todas las fracciones medidas en la capa 0 - 5 cm, excepto el  $P_i$  resina, presentaron entre 150 - 200% y 150 - 300% más P que en las capas 5 -10 y 0 - 20 cm, respectivamente.

En el caso del  $P_i$  resina, la capa superficial 0 - 5 cm presentó entre 396 y 670% más P que en las capas 5 -10 y 0 - 20 cm, respectivamente. Por tratarse de una "capa orgánica", la cantidad de materia orgánica y su tasa de mineralización, aseguran un considerable nivel de P en la solución del suelo. Además, es probable que el P lábil presente en la solución del suelo en esta capa, al estar menos propenso a fijarse en los componentes inorgánicos de la fase sólida del suelo, puede estar más disponible para las plantas.

**Cuadro 3.** Contenido de fósforo en las fracciones y P Total medidos a diferentes profundidades, para el período de junio/95 hasta junio/96. Valores en mg de P/kg de suelo.

| FRACCIONES<br>DE FOSFORO | PROFUNDIDADES* |           |           |
|--------------------------|----------------|-----------|-----------|
|                          | 0 - 5 cm       | 5 - 10 cm | 0 - 20 cm |
| $P_i$ resina             | 22,2 a         | 5,6 b     | 3,4 b     |
| $P_i$ NaHCO <sub>3</sub> | 38,9 a         | 19,1 b    | 15,0 c    |
| $P_i$ NaOH               | 439,9 a        | 341,7 b   | 306,5 c   |
| $P_i$ HCl                | 24,4 a         | 13,7 b    | 10,4 b    |
| $P_o$ NaHCO <sub>3</sub> | 70,2 a         | 57,4 b    | 53,3 c    |
| $P_o$ NaOH               | 583,5 a        | 545,4 b   | 525,6 c   |
| P residual               | 991,1 a        | 915,9 b   | 849,4 c   |
| P Total                  | 2170,2 a       | 1898,8 b  | 1763,6 c  |

\* Medias seguidas por la misma letra en la horizontal, son estadísticamente iguales al nivel de 5% de probabilidad por la prueba de Duncan.

### 4.3. Efecto de la época de muestreo sobre los contenidos de P de las fracciones

Todas las fracciones variaron sus contenidos de P, en función del tiempo. El análisis estadístico para la época de muestreo fue altamente significativo ( $p < 0.001$ ; Anexo 4).

Probablemente, estos cambios en el contenido de P de las fracciones, estuvo influenciado por el tipo de cultivo que se empleó cuando se realizaron los muestreos. En otras palabras, las diferencias en la cantidad de P extraída por los cultivos de maíz y frijol y el P recirculado por los residuos del maíz (Cuadro 4), fueron los dos factores que más contribuyeron a los cambios en el contenido de P de las fracciones.

**Cuadro 4.** Estimación de la cantidad de P incorporado en la biomasa del maíz y del frijol durante un año agrícola. La Montaña, Turrialba, Costa Rica. 1996. Valores en kg de P/ha.

| Tratamientos | Maíz                  |                             | Frijol              |                                      |
|--------------|-----------------------|-----------------------------|---------------------|--------------------------------------|
|              | Mazorcas <sup>1</sup> | Hojas + Tallos <sup>2</sup> | Vainas <sup>1</sup> | Hojas + Tallos + Raíces <sup>1</sup> |
| Estiércol +P | 6,7                   | 2,2                         | 2,1                 | 0,7                                  |
| Estiércol -P | 6,4                   | 2,0                         | 2,2                 | 0,8                                  |
| Mulch +P     | 6,3                   | 1,8                         | 2,5                 | 0,9                                  |
| Mulch -P     | 6,1                   | 1,9                         | 2,1                 | 0,7                                  |
| Callejón +P  | 3,6                   | 1,1                         | 2,6                 | 0,9                                  |
| Control +P   | 4,3                   | 1,4                         | 1,6                 | 0,6                                  |

<sup>1</sup> Exportados del sistema. <sup>2</sup> Recirculados en el sistema.

En el Cuadro 5, se observa que el contenido de P de las fracciones  $P_i$  resina,  $P_i$   $\text{NaHCO}_3$ ,  $P_i$   $\text{NaOH}$ ,  $P_i$   $\text{HCl}$  y  $P_o$   $\text{NaOH}$  de todos los tratamientos, disminuyó significativamente en el período de junio hasta diciembre/1995; intervalo de tiempo en el cual el maíz fue el cultivo asociado. Esto aparentemente indica que esta especie, por ser más exigente en nutrientes y producir una mayor cantidad de biomasa que el frijol, extrajo considerables cantidades de P de las fracciones lábiles y moderadamente lábiles del suelo. Al respecto, Malavolta *et al* (1989) señalan que para un mismo nivel de producción, el maíz extrae 2.2 veces más fósforo que el frijol.

**Cuadro 5.** Variación en el contenido de P de las fracciones y P Total de los tratamientos evaluados, en función de la época de muestreo. Valores en mg de P/kg de suelo.

| FRACCIONES<br>DE FOSFORO          | EPOCAS DE MUESTREO* |                |            |
|-----------------------------------|---------------------|----------------|------------|
|                                   | JUNIO 1995          | DICIEMBRE 1995 | JUNIO 1996 |
| P <sub>i</sub> resina             | 10,4 b              | 8,7 c          | 12,1 a     |
| P <sub>i</sub> NaHCO <sub>3</sub> | 23,9 b              | 21,8 c         | 27,3 a     |
| P <sub>i</sub> NaOH               | 386,8 b             | 297,2 c        | 405,0 a    |
| P <sub>i</sub> HCl                | 15,2 b              | 13,1 c         | 20,9 a     |
| P <sub>o</sub> NaHCO <sub>3</sub> | 53,8 b              | 90,5 a         | 37,8 c     |
| P <sub>o</sub> NaOH               | 568,7 b             | 511,9 c        | 583,9 a    |
| P residual                        | 902,1 b             | 1013,8 a       | 840,7 c    |
| P Total                           | 1960,9 a            | 1957,0 a       | 1927,7 b   |

\* Medias seguidas por la misma letra en la horizontal, son estadísticamente iguales al nivel de 5% de probabilidad por la prueba de Duncan.

Las fracciones P<sub>o</sub> NaHCO<sub>3</sub> y P residual fueron las únicas que presentaron aumentos significativos en el contenido de P en el período de junio hasta diciembre/95. Probablemente, el P reciclado por los residuos del maíz, además del P aportado por las enmiendas, contribuyeron a aumentar el contenido de P de las fracciones P<sub>o</sub> NaHCO<sub>3</sub> y P residual durante este período. Ello indica que entre junio y diciembre de 1995, estas dos fracciones se comportaron como "depósitos" para el P aportado/reciclado.

Una situación totalmente distinta se observó en el período desde diciembre/1995 hasta junio/1996, cuando el frijol fue el cultivo asociado. Esta especie por ser menos exigente en nutrimentos y producir una menor cantidad de biomasa que el maíz (Cuadro 4), extrajo una cantidad de P menor de la que estaba "disponible" en el suelo en este período.

Otra hipótesis que tal vez explica el aumento significativo en el contenido de P de las fracciones P<sub>i</sub> resina, P<sub>i</sub> NaHCO<sub>3</sub>, P<sub>i</sub> NaOH, P<sub>i</sub> HCl y P<sub>o</sub> NaOH en este período, es que el fósforo aportado/reciclado por las enmiendas y el reciclado

por los residuos del maíz, se mineralizó y liberó  $P_i$  al suelo, mientras que la otra parte se incorporó a la fracción orgánica extraída con NaOH. Por otro lado, la disminución significativa en el contenido de P de las fracciones  $P_o$ ,  $NaHCO_3$  y P residual observada en este período, permiten inferir que estas dos fracciones mantuvieron equilibrio con las otras fracciones de P del suelo, contribuyendo al suministro de P al cultivo.

Además de eso, como señalaron Hedley *et al* (1982), durante el desarrollo de los cultivos, los procesos específicos a nivel radicular, tales como la liberación de ión  $H^+$  y la producción de fosfatasa, pueden solubilizar parte del P presente en las fracciones orgánicas e inorgánicas más estables. Por lo antes expuesto, se deduce que entre diciembre/1995 hasta junio/1996, las fracciones  $P_o$ ,  $NaHCO_3$  y P residual se comportaron como "fuentes" de fósforo al cultivo.

#### 4.4. Interacciones entre las fracciones de P del suelo

De modo general, se observa que las fracciones inorgánicas presentan un alto coeficiente de correlación positivo entre sí, lo que indica el estado de equilibrio ocurrido entre ellas (Cuadros 6, 7 y 8).

Los coeficientes de correlación negativos observados entre fracciones orgánicas e inorgánicas, los cuales son más marcados en las enmiendas que no están asociadas a fertilización mineral y en el tratamiento Control +P (Cuadro 7 y 8), evidencian transferencia de P de las fracciones orgánicas para las inorgánicas. Esta hipótesis concuerda con los resultados reportados por Beck y Sánchez (1994), quienes informaron que el P mineralizado de las fracciones orgánicas y el  $P_i$  de las fracciones más resistentes, como el P residual, mantienen el nivel de P de las fracciones más lábiles. Otros estudios desarrollados anteriormente (Hedley *et al*, 1982; Tiessen *et al*, 1984; Szott, 1987; Paniagua, 1991) también demostraron la importancia del  $P_o$  y del  $P_i$  recalcitrante en el suministro de P para fracciones inorgánicas más lábiles.

**Cuadro 6.** Coeficientes de correlación♦ entre fracciones de fósforo del suelo, para las enmiendas asociadas con P mineral, para el período de junio/95 hasta junio/96.

|                                   | P <sub>i</sub> resina | P <sub>i</sub> NaHCO <sub>3</sub> | P <sub>i</sub> NaOH | P <sub>i</sub> HCl | P <sub>o</sub> NaHCO <sub>3</sub> | P <sub>o</sub> NaOH | P residual |
|-----------------------------------|-----------------------|-----------------------------------|---------------------|--------------------|-----------------------------------|---------------------|------------|
| P residual                        |                       |                                   |                     |                    | 0.65                              |                     | 1.00       |
| P <sub>o</sub> NaOH               |                       |                                   | 0.50                |                    |                                   | 1.00                |            |
| P <sub>o</sub> NaHCO <sub>3</sub> |                       |                                   | -0.58               |                    | 1.00                              |                     |            |
| P <sub>i</sub> HCl                | 0.81                  | 0.65                              |                     | 1.00               |                                   |                     |            |
| P <sub>i</sub> NaOH               | 0.58                  | 0.72                              | 1.00                |                    |                                   |                     |            |
| P <sub>i</sub> NaHCO <sub>3</sub> | 0.90                  | 1.00                              |                     |                    |                                   |                     |            |
| P <sub>i</sub> resina             | 1.00                  |                                   |                     |                    |                                   |                     |            |

♦Solamente son mostrados los coeficientes con probabilidad < 1%.; n = 54 (camadas 0-5 y 5-10 cm).

**Cuadro 7.** Coeficientes de correlación♦ entre fracciones de fósforo del suelo, para las enmiendas sin adición de P mineral, para el periodo de junio/95 hasta junio/96.

|                                   | P <sub>i</sub> resina | P <sub>i</sub> NaHCO <sub>3</sub> | P <sub>i</sub> NaOH | P <sub>i</sub> HCl | P <sub>o</sub> NaHCO <sub>3</sub> | P <sub>o</sub> NaOH | P residual |
|-----------------------------------|-----------------------|-----------------------------------|---------------------|--------------------|-----------------------------------|---------------------|------------|
| P residual                        |                       |                                   |                     |                    |                                   | -0.64               | 1.00       |
| P <sub>o</sub> NaOH               |                       |                                   |                     |                    | -0.50                             | 1.00                |            |
| P <sub>o</sub> NaHCO <sub>3</sub> |                       |                                   | -0.57               |                    | 1.00                              |                     |            |
| P <sub>i</sub> HCl                | 0.87                  | 0.87                              | 0.76                | 1.00               |                                   |                     |            |
| P <sub>i</sub> NaOH               | 0.87                  | 0.87                              | 1.00                |                    |                                   |                     |            |
| P <sub>i</sub> NaHCO <sub>3</sub> | 0.98                  | 1.00                              |                     |                    |                                   |                     |            |
| P <sub>i</sub> resina             | 1.00                  |                                   |                     |                    |                                   |                     |            |

♦Solamente son mostrados los coeficientes con probabilidad < 1%.; n = 36 (camadas 0-5 y 5-10 cm).

**Cuadro 8.** Coeficientes de correlación♦ entre fracciones de fósforo del suelo, para el tratamiento Control con adición de P mineral, para el periodo de junio/95 hasta junio/96.

|                                   | P <sub>i</sub> resina | P <sub>i</sub> NaHCO <sub>3</sub> | P <sub>i</sub> NaOH | P <sub>i</sub> HCl | P <sub>o</sub> NaHCO <sub>3</sub> | P <sub>o</sub> NaOH | P residual |
|-----------------------------------|-----------------------|-----------------------------------|---------------------|--------------------|-----------------------------------|---------------------|------------|
| P residual                        |                       |                                   |                     |                    |                                   |                     | 1.00       |
| P <sub>o</sub> NaOH               |                       |                                   |                     |                    |                                   | 1.00                |            |
| P <sub>o</sub> NaHCO <sub>3</sub> |                       | -0.60                             | -0.82               |                    | 1.00                              |                     |            |
| P <sub>i</sub> HCl                | 0.87                  | 0.63                              |                     | 1.00               |                                   |                     |            |
| P <sub>i</sub> NaOH               | 0.57                  | 0.76                              | 1.00                |                    |                                   |                     |            |
| P <sub>i</sub> NaHCO <sub>3</sub> | 0.75                  | 1.00                              |                     |                    |                                   |                     |            |
| P <sub>i</sub> resina             | 1.00                  |                                   |                     |                    |                                   |                     |            |

♦Solamente son mostrados los coeficientes con probabilidad < 1%.; n = 18 (camadas 0-5 y 5-10 cm).

El coeficiente de correlación negativo observado entre las fracciones  $P_o$  NaOH y  $P_o$  NaHCO<sub>3</sub>, principalmente en las enmiendas que no están asociadas a la fertilización mineral (Cuadro 7), muestra transferencia de P entre estas dos fracciones. Este fenómeno, también puede ser observado en el Cuadro 5. En el período del año que la fracción  $P_o$  NaHCO<sub>3</sub> disminuyó, la fracción  $P_o$  NaOH aumentó y viceversa. Sharpley (1985), al estudiar los cambios en las fracciones de P de suelos fertilizados y no fertilizados, encontró que la fracción  $P_o$  NaOH fue la que más cambió su contenido en P durante el período de estudio; sugiriendo que la transferencia de P entre las fracciones orgánicas se realizó de la menos lábil para la más lábil ( $P_o$  NaOH  $\Rightarrow$   $P_o$  NaHCO<sub>3</sub>).

#### **4.5. Contenido de P en las fracciones y rendimiento de los cultivos**

En el Cuadro 9, se presentan los contenidos de P de las fracciones y los rendimientos de maíz y frijol de los tratamientos evaluados. Se observa que los tratamientos que proporcionaron las mayores producciones de frijol no correspondieron con los que presentaron el mayor contenido de P en las fracciones, esto indica que el P no constituyó un factor limitante para el desarrollo del frijol.

Situación totalmente distinta se observó en el caso del maíz. Los tratamientos que presentaron los mayores contenidos de P en las fracciones más lábiles (Estiércol +P , Estiércol -P), fueron los que presentaron los mayores rendimientos, esto indica que el maíz puede tener su rendimiento afectado, en aquellos suelos con bajos niveles de P disponible.

**Cuadro 9.** Contenido de P en las fracciones, P Total y rendimiento del maíz y del frijol.

| Tratamientos* | RENDIMIENTO <sup>1</sup><br>(Kg/ha) |        | Contenido de fósforo en la fracción<br>( mg P/Kg de suelo ) |                                   |                     |                    |                                   |                     |                     |            |  |  | P<br>Total |
|---------------|-------------------------------------|--------|---|-----------------------------------|---------------------|--------------------|-----------------------------------|---------------------|---------------------|------------|--|--|------------|
|               | FRIJOL                              | MAIZ   | P <sub>i</sub> Resina                                       | P <sub>i</sub> NaHCO <sub>3</sub> | P <sub>i</sub> NaOH | P <sub>i</sub> HCl | P <sub>o</sub> NaHCO <sub>3</sub> | P <sub>o</sub> NaOH | P <sub>o</sub> NaOH | P Residual |  |  |            |
|               |                                     |        | 37,3 a  | 457,1 a                           | 28,7 a              | 69,4 a             | 568,0 ab                          | 917,7 a             |                     |            |  |  |            |
| Estiércol +P  | 857 b                               | 3048 a | 19,5 a  | 37,3 a                            | 457,1 a             | 28,7 a             | 69,4 a                            | 568,0 ab            | 917,7 a             | 2097,7 a   |  |  |            |
| Estiércol -P  | 927 b                               | 2933 a | 17,8 a  | 28,7 ab                           | 385,7 b             | 19,8 b             | 57,5 b                            | 548,5 b             | 921,4 a             | 1979,4 a   |  |  |            |
| Mulch +P      | 1057 a                              | 2813 b | 9,6 b   | 24,2 b                            | 364,3 b             | 13,4 b             | 59,2 b                            | 552,8 ab            | 919,5 a             | 1943,0 a   |  |  |            |
| Mulch -P      | 899 b                               | 2857 b | 8,3 b   | 13,1 c                            | 266,9 c             | 12,8 b             | 51,9 c                            | 497,2 c             | 872,9 a             | 1723,1 b   |  |  |            |
| Callejón +P   | 1076 a                              | 1654 d | 4,8 b   | 21,4 b                            | 366,2 b             | 13,7 b             | 65,8 a                            | 604,6 a             | 916,5 a             | 1993,0 a   |  |  |            |
| Control +P    | 664 c                               | 1936 c | 5,1 b   | 21,6 b                            | 365,9 b             | 12,7 b             | 55,6 b                            | 577,9 ab            | 964,7 a             | 2003,5 a   |  |  |            |

<sup>1</sup> Promedio de 12 años.

\* Medias de tratamientos seguidas por la misma letra en la horizontal, son estadísticamente iguales al nivel de 5% de probabilidad por la prueba de Duncan.

#### 4.6. Balance de P en el suelo y rendimiento de los cultivos

Cuando se discute balance de P en un sistema agroforestal tratado con enmiendas orgánicas, es importante distinguir entre el P recirculado dentro del sistema y el P adicionado al sistema .

El tratamiento Callejón +P, es el único que recircula P dentro del sistema suelo-planta. Por ejemplo, si se resta el P que fue adicionado por el abono fosfatado a esta enmienda durante los diez años, se observa que la cantidad de P recirculado en este tratamiento (12 Kg/ha/año) es relativamente bajo en comparación a los demás (Cuadro 10), lo que implica que los residuos de la poda del poró solo, no son suficientes para suministrar las cantidades de P necesarias para la satisfacción de las demandas de los cultivos a largo plazo. Por este motivo, se debe adicionar P en el sistema de cultivo en callejones, ya que se ha demostrado que las bajas cantidades de este elemento puede constituirse en el principal factor limitante en la producción de los cultivos bajo este sistema (Palm *et al*, 1995).

**Cuadro 10.** Balance del P aportado por los tratamientos y el P extraído por los cultivos de frijol y maíz durante 13 años. CATIE, Turrialba, Costa Rica. 1996.

| Tratamientos | Rendimiento (Kg/ha)*<br>(Promedio de 13 años) |        | P en el sistema<br>(Kg/ha/durante 13 años) |          |            |
|--------------|---|--------|--|----------|------------|
|              | Frijol  | Maíz   | Entrada                                    | Removido | Almacenado |
| Estiércol +P | 857 b   | 3048 a | 706  | 114      | 592        |
| Estiércol -P | 927 b   | 2933 a | 322  | 113      | 208        |
| Mulch +P     | 1057 a  | 2813 b | 662  | 115      | 547        |
| Mulch -P     | 899 b   | 2857 b | 278  | 110      | 168        |
| Callejon +P  | 1076 a  | 1654 d | 528  | 85       | 442        |
| Control +P   | 664 c   | 1936 c | 384  | 77       | 307        |

\* Medias de tratamientos seguidas por la misma letra en las columnas, son estadísticamente iguales al nivel de 5% de probabilidad por el teste de comparación múltipla de Duncan.

Finalmente, al analizar los rendimientos de los cultivos (Cuadro 10), se observa que, con la excepción de los cultivos en callejones, no se justificó asociar P mineral al mulch de poró y estiércol de ganado ya que éstas dos enmiendas con sus aportes al sistema son capaces, por sí solas, de proveer un nivel adecuado de P al suelo para el desarrollo de los cultivos. Paniagua *et al* (1994), en un estudio económico que realizaron en este mismo sitio experimental y donde compararon el efecto de enmiendas orgánicas asociadas a abono fosfatado sobre los rendimientos de los cultivos asociados, concluyeron que el sistema de cultivo en callejones con adición de P mineral, fue el que produjo la mayor ganancia neta y la mejor relación beneficio/costo cuando lo compararon con los otros tratamientos.

## 5. CONCLUSIONES.

- Los sistemas tratados con estiércol de ganado fueron los que presentaron los mayores contenidos de fósforo en las fracciones, destacándose el fertilizado con fósforo.

- La asociación de abono fosfatado a los sistemas tratados con estiércol de ganado y mulch de poró proporcionó mayores contenidos de fósforo en las fracciones de estos dos tratamientos, pero esto no se traduce en un aumento de igual magnitud en los rendimientos de los cultivos asociados.

- Para mantener un nivel adecuado de P en las fracciones y proporcionar un nivel satisfactorio de producción de los cultivos asociados a largo plazo, el sistema de cultivo en callejones con poró requiere de aplicación de abono fosfatado.

- Los cambios en las fracciones inorgánicas y orgánicas de P del suelo en sistemas con cultivos anuales, tratados con enmiendas orgánicas, son más evidentes en los primeros 10 cm de la capa superficial del suelo.

- Las fracciones orgánicas e inorgánicas más estables, representan una importante fuente de fósforo en los sistemas tratados con enmiendas orgánicas, fundamentalmente en aquellos que no están asociados a fertilización fosfatada. En este estudio las fracciones  $P_0$ ,  $\text{NaHCO}_3$  y P residual, fueron las que más variaron sus contenidos en P. En el intervalo de tiempo que se cultivó el maíz, estas dos fracciones se comportaron como "depósitos" para el P aportado no aprovechado por el cultivo. En el período que se cultivó el frijol, estas mismas fracciones se comportaron como "fuentes" de P al cultivo.

- De los dos cultivos evaluados, solamente el maíz tuvo su rendimiento influenciado por los contenidos de P en las fracciones del suelo.

## 6. BIBLIOGRAFIA

- ABRAMS, M.M.; JARREL, W.M. 1992. Bioavailability index for phosphorus using ion exchange resin impregnated membranes. *Soil Science Society of America Journal (EE.UU.)* 56(5):1532-1537.
- AMATO, M. ; JACKSON, R. B. ; BUTLER, J. H. A. ; LADD, J. N. 1984. Descomposition of plant material in Australia soils II : Residual organic C<sup>14</sup> and N<sup>15</sup> from plant legume parts descomposing under field and laboratory conditions. *Australian Journal of Soil Research (Australia)* 22(3):331-341.
- ANDERSON, G. 1980. Assessing organic phosphorus in soils. *In*. F. E. KHASAWNEH; E. C. SAMPLE ; E. J. KAMPRETH. (Eds). *The role of phosphorus in agriculture. ASA/CSSA/SSSA. Wiscosin, EE.UU.* p 411-431.
- BARROW, N.J. 1980. Evaluation and utilization of residual phosphorus in soils. *In*. F. E. KHASAWNEH; E. C. SAMPLE ; E. J. KAMPRETH. (Eds). *The role of phosphorus in agriculture. ASA/CSSA/SSSA. Wiscosin, EE.UU.* p 333-359.
- BÉCK, M.A.; SANCHEZ, P.A. 1994. Soil phosphorus fraction dynamics during 18 years of cultivation on a Typic Paleudult. *Soil Science Society of America Journal (EE.UU)* 34(6):1424-1431.
- BLAIR, G. J. ; BOLAND, O. W. 1978. The release of phosphorus from plant material added to soil. *Australian Journal of Soil Research (Australia)* 16(1):101-111.
- BOWMAN, R. A. ; COLE, C. V. 1978. Transformations of organic phosphorus substrates in soils evaluated by NaHCO<sub>3</sub> extraction. *Soil Science (EE.UU.)* 125(1):49-54.

- BROOKES, P.C.; POWLSON, D.S.; JENKINSON, D.S. 1982. Measurement of microbial biomass phosphorus in soil. *Soil, Biology and Biochemistry* (England) 14(4):319-329.
- CANTARELLA, H. ; ABREU, C. A. ; BERTON, R. S. 1992. Fornecimento de nutrientes pela materia orgânica do solo. *In*. Encontro sobre Materia Orgânica do Solo : Problemas e soluções (1, 1992, São Paulo, Brasil). I. A. GUERRINI ; L. T. BÜLL. Eds. p 63-122.
- CERRI, C. C. ; MORAES, J. F. L. 1992. Consequências do uso e manejo do solo no teor de materia orgânica. *In*. Encontro sobre Materia Orgânica do Solo : Problemas e soluções (1, 1992, São Paulo, Brasil). I. A. GUERRINI; L. T. BÜLL. Eds. p 25-36.
- CHANG, S. C. ; JACKSON, M. L. 1957. Fractionation of soil phosphorus. *Soil Science*. (EE.UU) 84(1):133-144.
- CHATER, M.; MATTINGLY, G.E.G. 1979. Changes in organic phosphorus contents of soils from long-continued experiments at Rothamsted and Saxmundham. Rothamsted Experimental Station. Report 1979(2). p 41-61.
- COLE, C.V.; JACKSON, M.L. 1951. Solubility equilibrium constant of dihydroxy aluminium dihydrogen phosphate relating to a mechanism of phosphate fixation in soils. *Soil Science Society of America Proceedings* (EE.UU.) 15(1):84-89.
- COLE, C.V.; INNIS, G.S.; STEWART, J.W.B. 1977. Simulation of phosphorus cycling in semiarid grasslands. *Ecology* (EE.UU.) 58(1):1-15.
- DALAL, R. C. 1977. Soil organic phosphorus. *Advances in Agronomy* (EE.UU) 29:83-117.

- DALTON, J. D. ; RUSSEL, G. C. ; SIELING, D. H. 1952. Effect of organic matter on phosphate availability. *Soil Science (EE.UU)* 73(1):173-181.
- ENWEZOR, W. D. 1967. Significance of the C: organic P ratio in the mineralization of soil organic phosphorus. *Soil Science (EE.UU)* 103(1):62-66.
- FASSBENDER, H.W. ; MÜLLER, L. ; BALERDI, F. 1968. Estudio del fósforo en suelos de América Central. II. Formas y su relación con las plantas. *Turrialba (C.R.)* 18(4):333-347.
- FASSBENDER, H. W.; BORNEMISZA, E. 1994. Fósforo. In: \_\_\_\_\_. *Química de suelos : Con énfasis en suelos de América Latina*. IICA, San José, Costa Rica. (Colección de libros y Materiales Educativos/IICA, Nº 81).
- FOX, R.L.; KAMPRATH, E.J. 1970. Phosphate sorption isotherms for evaluating the phosphate requeriment of soil. . *Soil Science Society of America Proceedings (EE.UU.)* 34(6):902-907.
- FROSSARD, E.; STEWART, J.W.B.; ARNAUD, R.J.ST. 1989. Distribution and mobility of phosphorus in grassland and forest soils of Saskatchewan. *Canadian Journal of Soil Science (Canada)* 69(2):401-416.
- FULLER, W. H. ; NIELSEN, D. R. ; MILLER, R. W. 1956. Some factors influencing the utilization of phosphorus from crop residues. *Soil Science Society of America Proceedings (EE. UU)* 20(2):218-224.
- GUTTERIDGE, R. C.; SHELTON, H. M. 1994. The scope and potential of tree legumes in agroforestry. *Agroforestry Systems (Netherlands)* 23(2-3):177-194.
- HAGGAR, J. P. ; WARREN, G. P. ; BEER, J. W. ; KASS, D. 1991. Phosphorus availability under alley cropping and mulched and unmulched sole cropping systems in Costa Rica. *Plant and Soil (Netherlands)* 137(2):275-283.

- HEDLEY, M.J.; STEWART, J.W.B. 1982. A method to measure microbial phosphorus in soils. *Soil, Biology and Biochemistry* (England) 14(4):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 Science Society of America Journal* (EE.UU) 46(5):970-976.
- HOLDRIDGE, L.R. 1987. La zona de vida. In. \_\_\_\_\_. *Ecología basada en zonas de vida*. IICA, San José, Costa Rica. p 1-8. (Colección Libros y Materiales Educativos/IICA, N° 83.)
- JACKSON, M.L. 1964. Chemical composition of soils. In. BEAR, F.E. Ed. *Chemistry of the soil*. Segunda edición. New York, Reinhold. p 71-144.
- KASS, D. L. 1987. Cultivo en callejones de cultivos alimenticios con leguminosas leñosas en Costa Rica. In. J. BEER ; H. W. FASSBENDER; J. HEUVELDOP. *Avances en la Investigación Agroforestal : Memoria del seminario*. CATIE, Turrialba, Costa Rica. p 222 - 236.
- KASS, D.L.; ARAYA, S.J.S.; SANCHEZ, J.O.; PINTO, M.L.S.; FERREIRA, P. 1992. Ten years experience with alley farming in Central America. Paper read at International Alley Farming Conference. IITA, Ibadan, Nigeria. 21 p.
- KANG, B.T. ; GRIME, H.; LAWSON, T. L. 1985. Alley cropping sequentially cropped maize and cowpea with *Leucaena* on a sandy soil in Southern Nigeria. *Plant and Soil* (Netherlands) 85(2):267-277.
- KANG, B. T. ; REYNOLDS, L. ; ATTA-KRAH, A. N. 1990. Alley farming. *Advances in Agronomy* (EE.UU) 43:315-359.

- KUCEY, R.M. 1983. Phosphate-solubilizing bacteria and fungi in various cultivated and virgin Alberta soils. *Canadian Journal of Soil Science (Canada)* 63(4):671-683.
- LEE, D.; HAN, X.G.; JORDAN, C.F. 1990. Soil phosphorus fractions, aluminum, and water retention as affected by microbial activity in an Udisol. *Plant and Soil (Netherlands)* 121(1):125-136.
- LI, G.C.; MAHLER, R. L. ; EVERSON, D. O. 1990. Effects of plant residues and environmental factors on phosphorus availability in soils. *Communications in Soil Science and Plant Analysis (EE.UU)* 21(4):471-491.
- LOPEZ ARANA. 1960. Valorización de las formas de fósforo orgánico e inorgánico de un suelo de la zona cafetera de Colombia. *Cenicafe (Colombia)* 11(7):189-204.
- LOPEZ-HERNANDEZ, D.; RODRIGUEZ, J.; SIEGERT, G. 1984. Competencia entre aniones orgánicos (malato y oxalato) con ortofosfato por los sitios de adsorción en suelos tropicales. *Turrialba (C.R.)* 34(3):291-296.
- LOPEZ, F.L.B. 1996. Comparación de la dinámica de P en cultivo en callejones y coberturas orgánicas para frijol (*Phaseolus vulgaris* L.) en San Juan Sur, Turrialba, Costa Rica. Tesis (Mag. Sc.). Turrialba, Costa Rica, CATIE. (En prensa).
- MARUMOTO, T. ; ANDERSON, J. P. E. ; DOMSCH, K. H. 1982. Mineralization of nutrients from soil microbial biomass. *Soil, Biology and Biochemistry (England)* 14(5):469-475.
- MATTA-MACHADO, R.P.; JORDAN, C.F. 1995. Nutrient dynamics during the first three years of an alleycropping agroecosystem in southern USA. *Agroforestry systems (Netherlands)* 30(3):351-362.

- McLAUGHLIN, J.R.; RYDEN, J.C.; SYERS, J.K. 1977. Development and evaluation of a kinetic model to describe phosphate sorption by hydrous ferric oxide gel. *Geoderma (Netherlands)* 18(4):295-307.
- McLAUGHLIN, M.J.; ALSTON, A.M. MARTIN, J.K. 1988. Phosphorus cycling in wheat-pasture rotations. II. The role of the microbial biomass in phosphorus cycling. *Australian Journal of Soil Research (Australia)* 26(2):333-342.
- MURPHY, J.; RILEY, J.P. 1962. A modified single solution method for determination of phosphate in natural waters. *Analytica Chimica Acta (Netherlands)* 27(1):31-36.
- OLSEN, S. R.; KHASAWNEW, F.E. 1980. Use and limitations of physical-chemical criteria for assessing the status of phosphorus in soils. *In*. The Role of Phosphorus in Agriculture (1, 1976, Alabama, EE.UU.). Trabajos. Eds. F.E. KHASAWNEH; E.C. SAMPLE; E.J. KAMPRATH. Wiscosin, EE.UU. ASA/CSSA/SSSA. p 361-410.
- ONIM, J. F. M. ; MATHUVA, M. ; OTIENDO, K. ; FITZHUGH, H. A. 1990. Soil fertility changes and responses of maize and beans to green manures of Leucaena, Sesbania and Pigeon pea. *Agroforestry Systems (Netherlands)* 12(2):197-215.
- PANIAGUA, A.M.; KASS, D.L.; MAZZARINO, M.J.; SOTO, M.L.; SZOTT, L.; DÍAZ-ROMEU, R.; FERNÁNDEZ, C.; JIMÉNEZ, M. 1994. Cambios en fracciones orgánicas e inorgánicas de fósforo en suelos con el uso de sistemas agroforestales. *Agroforestería en las Américas (C.R.)* 2(1):14-19.
- PANIAGUA, A.M. 1991. Metodología de fraccionamiento de fósforo del suelo, en un sistema de cultivo en callejones. Tesis (Mag. Sc.). Turrialba, Costa Rica, CATIE. 92 p.

- PALM, C. A. ; McKERROW, A. J. ; GLASENER, K. M. ; SZOTT, L. T. 1989. Agroforestry systems in lowland tropics : Is phosphorus important ? In. Phosphorus cycles in terrestrial and aquatic ecosystems. Regional Workshop : South and Central America (3, 1989, Maracay, Venezuela). H. TIESSEN; D. LÓPEZ- HERNÁNDEZ; I. H. SALCEDO. (Eds). p 134-141.
- PALM, C.A. 1995. Contribution of agroforestry trees to nutrient requirements of intercropped plants. *Agroforestry Systems (Netherlands)* 30(2):105-124.
- RAIJ, B. V. 1991. Fósforo. In. \_\_\_\_\_. Fertilidade do solo e adubação. POTAFOS, Campinas, São Paulo. ED. CERES. p 181-203.
- ROBERTS, K. J. ; WEAVER, R. M. 1973. Organic phosphorus in soils with special interest in soils of the tropics. Maizeell University, Ithaca, New York. 22 p.
- SALAZAR, A. 1990. Cultivo en callejones, algunos resultados de investigaciones en Yurimaguas, Cuenca Amazónica de Perú. Presentado en la Reunión de la Red de Investigadores de Suelos del Trópico (RISTROP), San José, Costa Rica. (mimeografiado).
- SANCHEZ, P.A. 1987. Management of acid soils in the humid tropics of Latin America. In. International Board for Soil Research and Management Incorporated (Naiorobi, Kenia). Management of acid soils for sustainable agriculture. Proceedings. Bangkok, 1987. IBSRAM Inaugural Workshop, Bangkok, Thailand. p 63-107.
- SHARPLEY, A.N.; TIESSEN, H.; COLE, C.V. 1987. Soil phosphorus forms extracted by soil tests as a function of pedogenesis. *Soil Science Society of America Journal (EE.UU)* 51(2):362-365.

- SHARPLEY, A.N. 1985. Phosphorus cycling in unfertilized and fertilized agricultural soils. *Soil Science Society of America Journal (EE.UU)* 49(4):905-911.
- SINGH, J.S.; RAGHUBANSHI, A.S.; SINGH, R.S.; SRIVASTAVA, S.C. 1989. Microbial biomass acts as a source of plant nutrients in dry tropical forest and savanna. *Nature (England)* 338(6215):499-500.
- STEEL, R.G.D.; TORRIE, J.H. 1988. Análisis de la varianza IV : diseño y análisis de parcelas divididas. In. STEEL, R.G.D.; TORRIE, J.H. *Bioestadística : Principios y procedimientos*. Trad. R. MARTINEZ. 2ª edición. Mexico, Mexico. MCGRAW-HILL. p 368-391.
- STRUTHERS, P.H.; SIELING, D.H. 1950. Effect of organic anions on phosphate precipitation by iron and aluminium as influenced by pH. *Soil Science (EE.UU.)* 69:205-213.
- SZOTT, L.T. 1987. Improving the productivity of shifting cultivation in the Amazon Basin of Peru through the use of leguminous vegetation. Tesis (Ph.D.), Raleigh, EE.UU, North Caroline State University. 168p.
- SZOTT, L. T. ; FERNANDEZ, E. C. M. ; SANCHEZ, P. A. 1991. Soil plant interactions in agroforestry systems. *Forestry, Ecology and Management (Netherlands)* 45(1-4):127-152.
- TATE, K.R.; NEWMAN, R.H. 1982. Phosphorus fractions of a climosequence of soils in New Zealand tussock grassland. *Soil, Biology and Biochemistry (England)* 14(3):191-196.
- TATE, K.R. 1984. The biological transformation of P in soil. *Plant and Soil (Netherlands)* 76(1-3):245-256.

- TIESEN, H.; STEWART, J.W.B. ; COLE, C.V. 1984. Pathways of phosphorus transformations in soils of differing pedogenesis. *Soil Science Society of America Journal (EE.UU)* 48(4):853-858.
- TIESEN, H. 1992. The study of phosphorus cycles in ecosystems. *In*. *Tropical Soil Biology and Fertility : A Handbook of Methods*. Eds. J.M. ANDERSON; J.S.I. INGRAM. 2ª edición. CAB International, Wallingford, England. p 179-188.
- TRAINA, S.J.; SPOSITO, G.; HESTERBERG, D.; KAFKAFI, U. 1986. Effects of pH and organic acids on orthophosphate solubility in an acidic, montmorillonitic soil. *Soil Science Society of America Journal (EE.UU.)* 50(1):45-52.
- VIEIRA, L.S. ; BORNEMISZA, E. 1968. Categorías de fósforo en los principales grandes grupos de suelos en la Amazonía de Brasil. *Turrialba (C.R.)* 18(3):242-248.
- ZECH, W.; HAUMAIER, L.; HEMPFLING, R. 1990. Ecological aspects of soil organic matter in tropical land use. *In*. *Humic substances in soil and crop sciences*. C.E. McCARTHY; R.L. GLAPP; P.R. BLOOM. Eds. Madison, Wisconsin, EE.UU. p 187-202.
- WESTIN, F. C.; BRITO, J. C. 1969. Phosphorus fractions of some Venezuelan soils as related to their stages of weathering. *Soil Science (EE.UU)* 107(3):194-202.
- WILLIAMS, C.H.; STEINBERGS, A. 1958. Sulphur and phosphorus in some eastern australian soil. *Australian Journal of Agriculture Research (Australia)* 9(4):483-491.
- WILLIAMS, J.D.H.; SYERS, J.K.; WALKER, T.W. 1967. Fractionation of soil inorganic phosphate by a modification of Chang and Jackson's procedure. *Soil Science Society of America Proceedings (EE.UU.)* 31(6):736-739.

- WILLIAMS, J.D.H.; SYERS, J.K.; HARRIS, R.F.; ARMSTRONG, D.E. 1971. Fractionation of inorganic phosphate in calcareous lake sediments . Soil Science Society of America Proceedings (EE.UU) 35(2):250-255.
- WIER, D.R. ; BLACK, C.A. 1968. Mineralization of organic phosphorus in soils as affected by addition of inorganic phosphorus. Soil Science Society of America Proceedings (EE.UU) 32(1):51-55.
- YAMOAHA, C. F. ; AGBOOLA, A. A. ; WILSON, G. F. ; MULONGOY, K. 1986. Soil properties as affected by the use of leguminous shrubs for alley cropping with maize. Agriculture, Ecosystems and Environment (Netherlands) 18:167-177.

**Anexo 1.** Características químicas del suelo de los tratamientos evaluados (profundidad 0 - 20 cm). "La Montaña", Turrialba, Costa Rica, 1996.

| Tratamientos     | pH               | P<br>(mg/Kg) <sup>1</sup> | Ca          | Mg   | K    | Acidez<br>extraíble | M.O.<br>(%) | N<br>(%) |
|------------------|------------------|---------------------------|-------------|------|------|---------------------|-------------|----------|
|                  | H <sub>2</sub> O |                           | (meq/100 g) |      |      |                     |             |          |
| Estiércol +P     | 5,7              | 37,3                      | 5,67        | 2,25 | 0,84 | 0,25                | 6,22        | 0,28     |
| Estiércol -P     | 5,8              | 28,7                      | 5,80        | 2,22 | 0,88 | 0,18                | 5,46        | 0,25     |
| Mulch +P         | 5,5              | 24,2                      | 4,37        | 1,38 | 0,89 | 0,45                | 5,71        | 0,26     |
| Mulch -P         | 5,7              | 13,0                      | 4,96        | 1,71 | 0,98 | 0,27                | 5,38        | 0,25     |
| Callejón Poró +P | 5,2              | 21,4                      | 3,88        | 1,33 | 0,70 | 0,68                | 6,41        | 0,29     |
| Control +P       | 5,4              | 21,6                      | 3,77        | 0,97 | 0,54 | 0,78                | 5,65        | 0,25     |

<sup>1</sup> Olsen Modificado

## Anexo 2. Metodología para la determinación de las fracciones de fósforo del suelo

### a) *Determinación de las fracciones inorgánicas*

**DIA 1** : Pesar 1.5 g de suelo seco al aire (tamizado en malla de 0.2 mm) en tubos de centrifuga de polietileno. Agregar 30 ml de agua destilada y 2 resinas intercambiadoras de aniones (1.5 cm x 1.5 cm). Agitar por 16 hrs.

**DIA 2** : Sacar las resinas y trasvasar a otros tubos de centrifuga limpios. Adicionar 20 ml de HCl 0,5 M. Agitar por 1 hora. Sacar las resinas y regenerarlas utilizando  $\text{NaHCO}_3$  1 M.

Mientras se agita, centrifugar el suelo que se encuentra en suspensión a 5000 rpm por 10 minutos (lo ideal es centrifugar a 10000 rpm). Deshechar el sobrenadante. Guardar el suelo para la siguiente extracción.

Tomar una alícuota de 15 ml de la solución de HCl 0,5 M y trasvasar a balones volumétricos de 50 ml para analizar el contenido de P por el método de Murphy y Riley (1962). En el presente caso, la longitud de onda que se utilizó para efectuar la lectura de P en los diferentes extractos fue de 830 nm.

Al suelo centrifugado, agregar 30 ml de bicarbonato de sodio ( $\text{NaHCO}_3$ ) 0,5 M a pH 8,5 y agitar por 16 hrs.

**DIA 3** : A los tubos conteniendo el suelo +  $\text{NaHCO}_3$  0,5 M, agregar 0,2 ml de superfloc (0,05%) y agitar por 1 minuto. Después, centrifugar por 10 minutos. Tomar una alícuota de 15 ml y transferir para tubos de centrifuga limpios. En seguida, añadir 5 ml de  $\text{H}_2\text{SO}_4$  2.4 N para precipitar la materia orgánica en suspensión. Centrifugar por 10 min.

Mientras se centrifuga, el sobrenadante que quedó en los tubos con el suelo, trasvasarlo a recipientes limpios con tapa, para futuros análisis de  $P_{\text{Total}}$  en  $\text{NaHCO}_3$  por digestión.

De la solución centrifugada, tomar una alícuota de 10 ml y transferirla para balones de 50 ml. Analizar el P colorimétricamente por el método de Murphy y Riley (1962).

A los tubos conteniendo el suelo centrifugado, agregar 30 ml de hidróxido de sodio ( $\text{NaOH}$ ) 0,1 M y agitar por 16 hrs.

**DIA 4** : Retirar los tubos del agitador y centrifugarlos a 5000 rpm por 10 minutos. Tomar una alícuota de 10 ml y transferir para tubos limpios. Adicionar 4 ml de  $\text{H}_2\text{SO}_4$  2.4 N. Agitar por 10 minutos.

Mientras se centrifuga, de los tubos que contienen el suelo, trasvasar el sobrenadante restante, a frascos limpios con tapa, para futuros análisis de  $P_{\text{Total}}$  en  $\text{NaOH}$ .

De la solución centrifugada, tomar una alícuota de 1 ml y transferir para balones de 50 ml. Analizar el P colorimétricamente por el método de Murphy y Riley (1962).

A los tubos conteniendo el suelo centrifugado, agregarles 30 ml de ácido clorhídrico ( $\text{HCl}$ ) 1 N y agitar por 16 hrs.

**DIA 5** : Retirar los tubos del agitador y centrifugarlos por 10 minutos a 5000 rpm. De la solución sobrenadante, tomar una alícuota de 15 ml y transferir para los balones de 50 ml. Analizar el P colorimétricamente por el método de Murphy y Riley (1962). El sobrenadante restante debe ser eliminado y el suelo transferido para tubos de vidrio de 25 x 200 mm. Evaporar el agua existente por 24 - 36 hrs, a una temperatura de 115 °C.

**DIA 8** : A los tubos conteniendo el suelo, añadirles 8 ml de una mezcla de ácido nítrico + ácido perclórico + ácido sulfúrico (en la proporción de 4:2:2). Digerir las muestras por 3 hrs. Los 30 primeros minutos a una temperatura de 150 °C. Elevar la temperatura para 220 ° C y mantenerla por una hora. Posteriormente se debe elevar la temperatura a 270 ° C y digerir por 1 - 1,5 hrs.

nota : Las muestras se consideran totalmente digeridas, cuando el suelo se torna totalmente blanco.

Trasvasar todo el suelo + solución de los tubos a balones de 100 ml. Lavar bien los tubos con agua destilada. Completar el volúmen del balón. Poner tapas y agitarlos. Dejar en reposo por 16 hrs para que las partículas sólidas se precipiten.

**DIA 9** : Pipetear 3 ml de la solución y transferir para balones de 50 ml. Analizar el P colorimétricamente por el método de Murphy y Riley (1962).

#### *b) Determinación de las fracciones orgánicas*

De los extractos de  $\text{NaHCO}_3$  y  $\text{NaOH}$ , tomar una alícuota de 5 ml y 1 ml, respectivamente. Trasvasar para tubos de vidrio de 25 x 200 mm. A los tubos que contienen las alícuotas de 5 ml y 1 ml, adicionar 1,5 ml y 1,0 ml de  $\text{H}_2\text{SO}_4$  concentrado, respectivamente. Agitar los tubos hasta mezclar bien el extracto con el ácido sulfúrico. Colocar los tubos en un digestor a una temperatura inicial de 150 °C; después de pasados 30 minutos, elevar la temperatura hasta 250 °C. Dejar las muestras en el digestor por más de 1 - 1,5 hrs. Con posterioridad se sacan las muestras y se ponen a enfriar. Cuando estén frías se les añade 1,0 ml de  $\text{H}_2\text{O}_2$  libre de P y se ponen en el digestor por 30 min a 200 °C, para evaporar el  $\text{H}_2\text{O}_2$ .

Se sacan los tubos del digestor y se ponen a enfriar; trasvasando el contenido de los tubos para balones de 50 ml. Lavar bien los tubos con agua destilada. Analizar el P colorimétricamente por el método de Murphy y Riley (1962).

El  $P_{\text{orgánico}}$  de ambos extractos se calcula por diferencia :

- $P_o \text{ NaHCO}_3 = P_{\text{Total en NaHCO}_3} - P_i \text{ extraído en NaHCO}_3 \text{ 0,5 M.}$
- $P_o \text{ NaOH} = P_{\text{Total en NaOH}} - P_i \text{ extraído en NaOH 0,1 N.}$

### **Anexo 3. Metodología para la determinación del P Total de las muestras de suelo**

Pesar 1,5 g de suelo seco al aire en tubos de vidrio de 25 x 220 mm. Añadir 8 ml de una mezcla de ácido nítrico + ácido perclórico + ácido sulfúrico (proporción de 4:2:2). Digerir las muestras por 3 hrs. Los 30 primeros minutos a una temperatura de 150 °C. Elevar la temperatura a 220 °C y mantener por una hora. A continuación, aumentar la temperatura a 270 °C y digerir por 1 - 1,5 hrs. Cuando el suelo de los tubos se ponga blanco, trasvasar todo el contenido de los tubos a balones de 100 ml. Lavar bien los tubos con agua destilada. Completar el volúmen del balón. Poner tapas y agitarlos. Dejar en reposo por 16 hrs para que las partículas sólidas se precipiten.

Al día siguiente, pipetear 1 ml de la solución y transferir para balones de 50 ml. Analizar el P colorimétricamente por el método de Murphy y Riley (1962).

**Anexo 4. Análisis de varianza para siete fracciones de P y P Total en un diseño de parcela subdividida en el espacio y en el tiempo, para los factores tipo de enmienda orgánica (Tratamiento), profundidad (Profundidad) y época de muestreo (Epoca).**

| Causas de variación               | gl | P <sub>i</sub> Resina | P <sub>i</sub> NaOH               |                    |                                   | P <sub>o</sub> NaOH |                                   |           | P residual | P Total |
|-----------------------------------|----|-----------------------|-----------------------------------|--------------------|-----------------------------------|---------------------|-----------------------------------|-----------|------------|---------|
|                                   |    |                       | P <sub>i</sub> NaHCO <sub>3</sub> | P <sub>i</sub> HCl | P <sub>o</sub> NaHCO <sub>3</sub> | P <sub>o</sub> HCl  | P <sub>o</sub> NaHCO <sub>3</sub> |           |            |         |
| Bloque ♦                          | 2  | 2.73                  | 0.12                              | 3.80               | 2.83                              | 2.13                | 1.64                              | 2.61      |            |         |
| Tratamiento ♦                     | 5  | 7.51**                | 10.70***                          | 1.89**             | 9.06***                           | 6.08**              | 0.98 <sup>n.s.</sup>              | 5.31**    |            |         |
| Profundidad ♦                     | 2  | 134.67***             | 712.40***                         | 40.18***           | 174.12***                         | 61.03***            | 70.58***                          | 813.72*** |            |         |
| Trat x Profundidad ♦              | 10 | 7.78***               | 12.94***                          | 2.27*              | 0.75                              | 0.84                | 0.69                              | 6.99***   |            |         |
| Epoca                             | 2  | 17.20***              | 23.60***                          | 74.03 ***          | 1597.52**                         | 18.57***            | 30.87***                          | 3.73*     |            |         |
| Epoca x Tratamiento               | 10 | 1.34                  | 1.00                              | 1.68               | 7.87***                           | 3.62***             | 1.96*                             | 1.39      |            |         |
| Epoca x Profundidad               | 4  | 11.78 ***             | 9.07***                           | 3.58**             | 28.80***                          | 0.71                | 0.87                              | 3.32**    |            |         |
| Epoca x Tratamiento x Profundidad | 20 | 0.81                  | 0.86                              | 0.48               | 0.70                              | 0.26                | 0.36                              | 0.52      |            |         |
| CV(%) Parcela                     |    | 27.45                 | 16.87                             | 21.58              | 8.18                              | 10.64               | 12.65                             | 4.79      |            |         |
| CV(%) Sub-parcela                 |    | 68.50                 | 53.05                             | 78.63              | 16.99                             | 15.84               | 16.59                             | 14.56     |            |         |

♦ El valor de F fue calculado utilizando Bloque x Tratamiento como un término de error.

♦ El valor de F fue calculado utilizando Bloque x Profundidad (Tratamiento) como un término de error.

\*, \*\*, \*\*\* Significativo al nivel de 5, 1 y 0.1% de probabilidad., respectivamente.