

COMPORTAMIENTO DEL FOSFORO EN SUELOS DERIVADOS DE CENIZAS VOLCANICAS*

por

Josué Quintero Quintero**

Resumen

Quintero, J.: Comportamiento del fósforo en suelos derivados de cenizas volcánicas. Rev. Acad. Colomb. Cienc. 17 (66): 467-476, 1990, ISSN 0370-3908.

Se proporciona información básica sobre los andosoles y acerca de la dinámica del P en el suelo; se adicionan resultados de algunas investigaciones realizadas en la Sabana de Bogotá en relación con el comportamiento del fósforo y con las formas de aprovechamiento como fertilizante de la roca fosfórica nacional, ya sola, ya combinada con superfosfato triple o con fertilizantes nitrogenados.

Introducción

Quizás uno de los aspectos que mayor interés ha despertado entre las personas dedicadas al estudio de las Ciencias de Suelo, es tratar de aclarar el comportamiento del fósforo en los suelos y sus implicaciones en la nutrición vegetal.

El estudio de las causas de la deficiencia de fósforo debe basarse en la interpretación del sistema suelo-planta, para identificar qué fenómeno está interfiriendo en la nutrición adecuada de las plantas. Para ello es necesario considerar en primer lugar las formas del fósforo en el suelo y después sus interacciones con la planta.

Desde el punto de vista de la disponibilidad de nutrimentos interesan dos parámetros: la concentración de iones presentes en la solución del suelo o su actividad iónica (parámetro intensidad) y la reserva total del elemento ligada con la fase sólida para reponer los iones de la solución del suelo, cuando éstos son absorbidos por la planta (parámetro capacidad).

La despensa agrícola de nuestro país, localizada sobre las vertientes de las cordilleras andinas, está constituida en una considerable extensión por suelos derivados de cenizas volcánicas. Sin embargo su producción se ve seriamente limitada por la baja disponibilidad de fósforo, la alta fijación de fosfatos y el alto costo de los fertilizantes fosforados. Estos suelos requieren adiciones de por lo menos 200 Kg. de P/Ha con el fin de proporcionar una concentración de equilibrio de 0.2 p.p.m. de P en la solución.

Los suelos derivados de cenizas volcánicas (andosoles), los cuales se encuentran ampliamente distribuidos en el cinturón volcánico del Pacífico, han venido siendo objeto de estudios intensivos durante los últimos 20 años. A diferencia de suelos derivados de otros materiales no piroclásticos, estos suelos por la naturaleza del P-nativo y el comportamiento del P-aplicado imponen ciertas restricciones en el estudio y empleo de este elemento.

El presente trabajo tiene como objetivo principal proporcionar una información básica relacionada con las características de los andosoles en Colombia, la dinámica del fósforo en el suelo y algunos trabajos de investigación que se han realizado en el Departamento de Química de la Universidad Nacional de Colombia, sobre el comportamiento del fósforo en suelos derivados de cenizas volcánicas de la Sabana de Bogotá.

* Estudio científico leído en el recinto de la Academia el 30 de abril de 1986 con ocasión de su posesión como académico correspondiente.

** Profesor Asociado Departamento de Química, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, D.E.

Los andosoles en Colombia

Los suelos derivados de ceniza volcánica son de gran importancia en Colombia, por cuanto una extensión considerable de ellos —que se encuentran sobre las cordilleras andinas— tienen como material parental ceniza, tobas y lava volcánica. Su estudio presenta cierta complejidad ya que intervienen factores importantes como clima, topografía, presencia de formaciones geológicas que no son de origen volcánico y el tiempo de meteorización de las rocas.

El basamento andino, en lo que respecta a zonas de volcanismo, se halla compuesto por las siguientes formaciones: en el departamento de Nariño, andesitas, basaltos y tobas del cenozoico; continuando en dirección norte en el departamento del Cauca, se encuentran sedimentos no diferenciados (tobas, ceniza, lava, etc.), igualmente del cenozoico; en los departamentos de Risaralda, Tolima, Quindío, Caldas y Antioquia, preferentemente formaciones metamórficas del paleozoico e ígneas del cenozoico y en el departamento de Cundinamarca, sedimentos del Terciario y Cuaternario (15).

Características morfológicas

Las características morfológicas de los andosoles en Colombia, en general se identifican con

aquellas establecidas en otros lugares del mundo (Japón, Nueva Zelandia, Hawaii, Chile). Sin embargo, estos suelos presentan ciertas peculiaridades que los distinguen de los suelos de otras latitudes. Aún dentro del mismo territorio los suelos presentan diferencias originadas por condiciones climáticas, topográficas, tiempo de deposición de la ceniza y composición del material piroclástico.

Características fisicoquímicas

- pH ácido a ligeramente ácido
- Capacidad catiónica de cambio alta y capacidad aniónica de cambio relativamente alta.
- Baja saturación de bases
- Contenido de materia orgánica alto
- Dispersión difícil
- Retención de humedad alta
- El alofan es el principal constituyente de la fracción arcilla en el horizonte superficial y haloisita hidratada, caolinita y gibsita en los horizontes inferiores (8).

La ceniza volcánica como material parental del suelo

La meteorización de los minerales primarios a partir de una ceniza volcánica puede conducir a la formación de diversos minerales secundarios bajo condiciones de buen drenaje y humedad (Fig. 1).

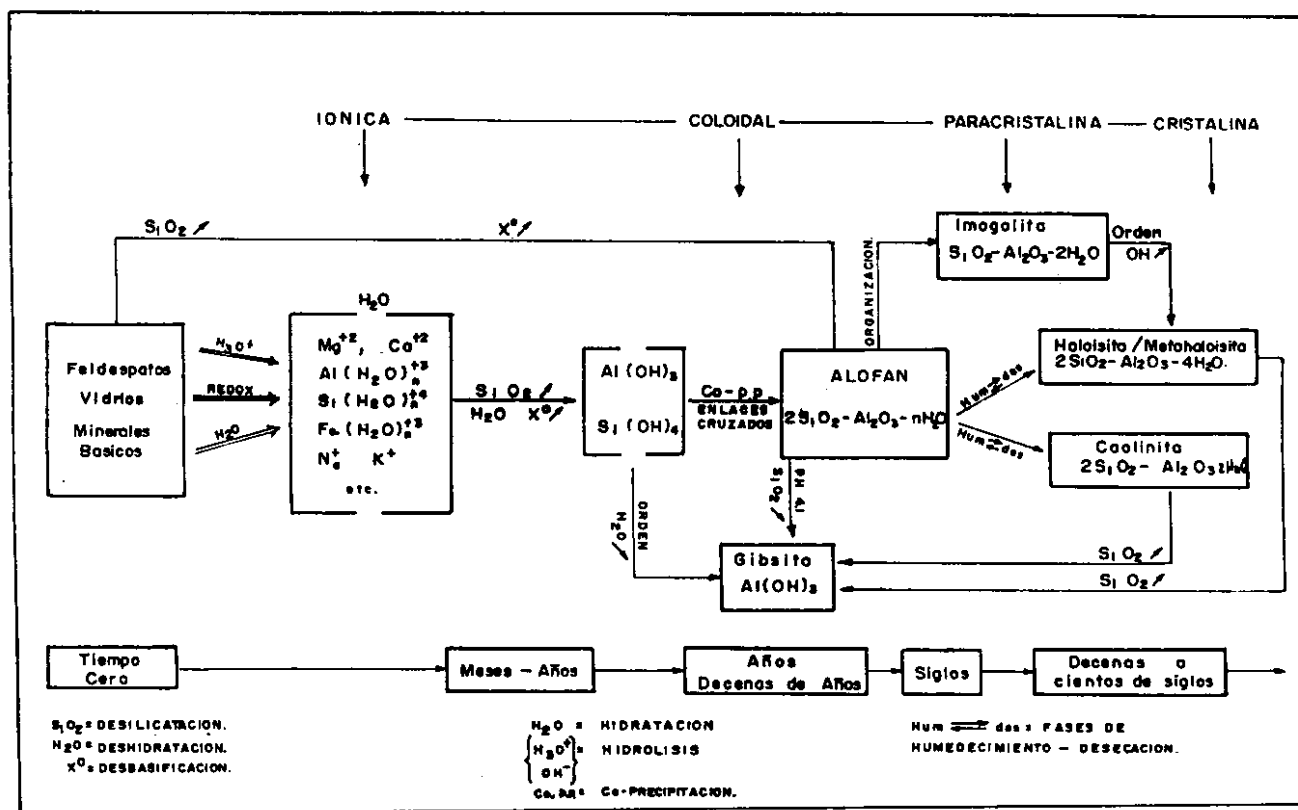


Figura 1. Esquema de las reacciones probables que se forman durante la meteorización de cenizas volcánicas en condiciones adecuadas de humedad y drenaje.

En el desarrollo de esta secuencia podrían considerarse cuatro etapas: iónica, coloidal, cripto-cristalina o para-cristalina y cristalina.

En el proceso de "andolización" o "alofanización" las primeras etapas serían sumamente rápidas. La etapa iónica, por ejemplo, se cumpliría en meses; la etapa coloidal podría iniciarse en meses o años y una vez formado el alofan, éste podría persistir por algunos miles de años en el sistema.

Vidrios volcánicos, feldespatos y minerales básicos originan por meteorización (ej. disolución, hidrólisis, oxidación, reducción, etc.), un sistema iónico, el cual por desilicatación y desbasificación en medio acuoso origina un sistema coloidal incluyendo $\text{Si}(\text{OH})_4$, $\text{Al}(\text{OH})_3$, y $\text{Fe}(\text{OH})_3$ altamente hidratados. El pH del sistema es ácido inmediatamente después de depositadas las cenizas, por acción de los componentes sulfurados, pero con las primeras lluvias disminuye fuertemente esta acidez. La disolución posterior de los componentes básicos de las cenizas hacen que el pH del sistema se haga alcalino. A medida que el sistema se desalcaliniza, geles de sílice y alúmina co-precipitan (pH 6.2) para formar el alofan (inicialmente se origina alofan B, luego por integración a través de enlaces cruzados se forma alofan A). El alofan puede evolucionar hacia haloisita o hacia caolinita.

Podría admitirse una evolución de haloisita en caolinita, aunque hay restricciones estructurales. Una fase para - cristalina, la imogolita podría producirse por reordenamiento parcial del alofan, con transformación posterior por deshidroxilación y ordenamiento en haloisita.

El alofan podría desilicatarsen en ambiente ácido para originar gibsita. También la haloisita y caolinita podrían por desilicatación originar gibsita, sin embargo, la gibsita podría también producirse en una fase inicial directamente a partir de geles de aluminio. También el alofan podría producirse directamente a partir de vidrios volcánicos, por reacciones de desilicatación, hidratación y desbasificación.

Efecto del alofan en la retención de fósforo

Es bien sabido el papel que desempeñan las arcillas en la retención de los fosfatos, y de aquellas, quizás es el alofan el que exhibe esta propiedad en grado máximo.

Algunos autores citados por Ospina (13), sugieren que en suelos que contienen alofan, la relación $\text{Al}/\text{Al} + \text{Si}$, es el factor determinante de la adsorción y disponibilidad del fosfato. La adsorción aumenta y la disponibilidad disminuye al aumentar el contenido de aluminio en la fase amorfa.

Es evidente entonces que el aluminio es responsable en gran parte por la retención del fosfato en los andosoles, retención que bien puede ser a través de un mecanismo de adsorción, precipitación,

hidrólisis o disociación y que merece ser descifrado para cada suelo, si se quiere llegar a un conocimiento cabal sobre el comportamiento del fósforo aplicado y sus implicaciones en el manejo de los suelos.

Dinámica del fósforo en el suelo

La química del fósforo en el suelo es tan complicada que cualquier presentación del tema puede salirse fácilmente de las manos a menos que se fijen límites de discusión.

Desde el punto de vista de la nutrición vegetal existen tres importantes fracciones del fósforo en los suelos: a) fósforo en la solución del suelo; b) fósforo en la fracción lábil y c) fósforo en la fracción no-lábil.

La primera fracción está definida claramente como el ión fosfato "actualmente" en la solución del suelo. La segunda es el fosfato que se mantiene moderadamente unido a superficies activas y que está en equilibrio con el fósforo de la solución; usualmente también se denomina fosfato intercambiable. La tercera es el fosfato insoluble tanto orgánico como inorgánico y que sólo puede liberarse hacia la fracción lábil en forma muy lenta. Estas dos últimas fracciones comprenden entre el 95 y el 99% del fósforo total del suelo (9).

P-inorgánico en la fracción no-lábil

El fósforo inorgánico insoluble en los suelos está asociado en su mayor parte a tres elementos metálicos, de los cuales el hierro y el aluminio son los principales responsables en suelos ácidos y el calcio en suelos neutro-alcalinos.

El conocimiento de las interacciones del fósforo con estos elementos en sus diferentes formas, es de gran interés para interpretar las relaciones suelo-planta, conocer la dinámica de este elemento e interpretar los procesos de génesis y desarrollo de los suelos.

P-orgánico en la fracción no-lábil

La cantidad de fósforo insoluble que está en forma orgánica varía ampliamente y en general constituye entre 30 y 85% en el horizonte superficial. Este es particularmente alto en suelos ácidos y generalmente se le relaciona con el carbono y el nitrógeno en proporciones de aproximadamente 110 partes de C, 9 partes de N y una parte de P.

Los compuestos que han sido identificados con mayor exactitud son los inositol-fosfatos (fitatos), fosfolípidos y ácidos nucleicos. Además de estos tres grupos hay evidencias de cantidades pequeñas de fosfo-proteínas y azúcar-fosfato.

Los inositol-fosfatos existen en el suelo en formas muy complejas, probablemente unidos en un compuesto que contiene carbohidratos y proteínas.

o bien, ligados químicamente a moléculas mayores a través de sus grupos fosfóricos. Estos compuestos son muy resistentes a la descomposición y su acumulación se ha atribuido a interacciones físico-químicas con los coloides del suelo, similares a aquellas responsables de la fijación de fosfatos (1).

Fósforo en la fracción lábil

En el conjunto de procesos por los cuales el fosfato existente en solución desaparece de ella para pasar a la fase sólida del suelo, ocurren dos fenómenos diferentes: por un lado, parte del fosfato es retenido por el suelo de tal manera que es posible su posterior extracción con ácidos diluidos. Este fósforo se considera disponible para las plantas, pues se encuentra en un equilibrio dinámico con el fósforo que permanece en la solución del suelo. A este proceso la mayoría de los autores lo denominan "retención de fosfato". De otro lado, parte del fósforo en solución, o el mismo fósforo retenido en forma intercambiable va siendo paulatinamente fijado por la fase sólida en forma no-intercambiable, es decir, que a medida que estas formas "envejecen" van pasando lentamente de la fracción lábil a la no lábil.

A este proceso se le suele denominar "fijación", aunque el término es una exageración, puesto que las reacciones del fósforo no son totalmente irreversibles. La extensión y características de la superficie de adsorción son los factores más importantes que controlan la concentración de fósforo en la solución del suelo.

Fósforo en la solución del suelo

Se acepta universalmente que la mayor fuente de fósforo que utilizan los vegetales es como H_2PO_4 presente en la solución del suelo. Teniendo en cuenta que la concentración de fósforo en el interior de la planta es usualmente 1.000 veces mayor que en el exterior, es evidente que se necesita mucha energía para que ocurra la absorción con tal gradiente de concentración.

La velocidad de difusión del ión fosfato es inferior a la velocidad de captación por las raíces, razón por la cual se produce una zona de agotamiento. Al añadir fertilizante fosforado al suelo se rompe ese equilibrio manteniéndose alta la concentración de fósforo soluble cerca de la raíz por períodos relativamente largos, dependiendo de la capacidad de fijación de ese suelo. Sin embargo, solamente entre el 10 y el 25% del fertilizante es captado por la cosecha; el resto permanece como "fosfato residual" para próximas cosechas.

Transformaciones microbiológicas del fósforo

Muchos de los microorganismos más comunes del suelo, tanto bacterias como hongos, son capaces de disolver fosfatos orgánicos e inorgánicos. La

complejación es tal vez el mecanismo más importante de solubilización de fosfatos cuando actúan los microorganismos del suelo al segregar al medio ácidos orgánicos (láctico, cítrico, málico y otros), que complejan fuertemente el calcio, el hierro y el aluminio (14).

Muchas plantas cultivadas y silvestres forman una asociación simbiótica con hongos del suelo. En este tipo de asociación denominada *micorriza*, el hongo invade parte del tejido de la raíz y así, la planta y el hongo se benefician de ella.

Aunque existen dificultades prácticas para promover la formación de micorrizas en el campo, este aspecto tiene un gran potencial agrícola para ahorrar fertilizantes y aumentar la productividad (10).

El fósforo en andosoles de la Sabana de Bogotá

Desde el año de 1975 se vienen adelantando en el Departamento de Química de la Universidad Nacional de Colombia, con la colaboración del Instituto Nacional de Investigaciones Químicas —INGEOMINAS— y el Instituto Colombiano Agropecuario —ICA—, algunos trabajos de investigación relacionados con el comportamiento del fósforo en suelos derivados de cenizas volcánicas de la Sabana de Bogotá.

En estos estudios se evalúan aspectos de gran importancia como son: Capacidad de retención de fosfatos y su disminución por aplicación de silicatos; transformaciones del fósforo en el suelo al aplicarlo como fuentes de alta y baja solubilidad y mejor aprovechamiento de roca fosfórica nacional.

1. Retención de fosfatos en suelos de la Sabana de Bogotá (Serie Tibaitatá)

Trabajando con doce suelos de la Serie Tibaitatá, se estudió la relación existente entre la capacidad de retención de fósforo y algunas características químicas del suelo, así como también la influencia que tienen diferentes fuentes y dosis silicatadas sobre la retención (13).

Los suelos estudiados presentaron una alta capacidad de retención (entre el 90 y el 99% del fósforo suministrado fue retenido por el suelo) y de acuerdo con las correlaciones encontradas (Figs. 2, 3 y 4), dicha retención depende primordialmente del contenido de materia orgánica, y óxidos de hierro y aluminio. Por otra parte al existir una acidez manifiesta, se puede suponer el establecimiento de un equilibrio silicato-fosfato en el complejo de adsorción del suelo. Según la Fig. 5, incrementos en el contenido de sílice disminuyen la retención de fósforo. Estas correlaciones concuerdan con estudios realizados por Guerrero (6) en suelos volcánicos del sur de Colombia.

Con base en los resultados anteriores se estudió la influencia de fuentes silicatadas en la capaci-

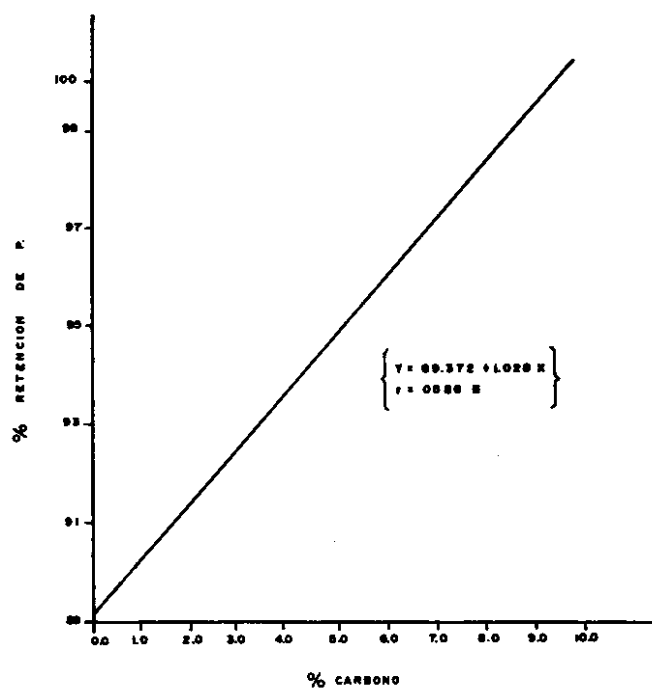


Figura 2. Relación entre la retención de fósforo y la materia orgánica en andosoles de la Sabana de Bogotá.

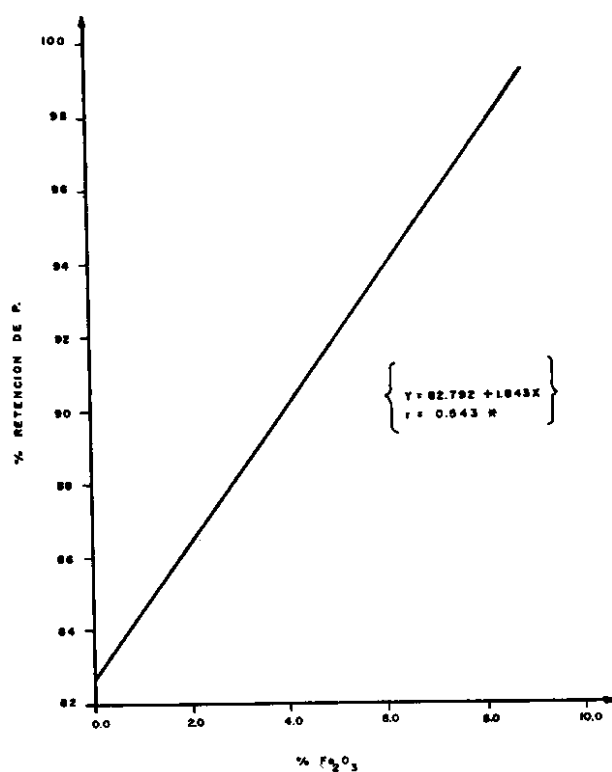


Figura 3. Relación entre la retención de fósforo y el contenido de hierro en andosoles de la Sabana de Bogotá.

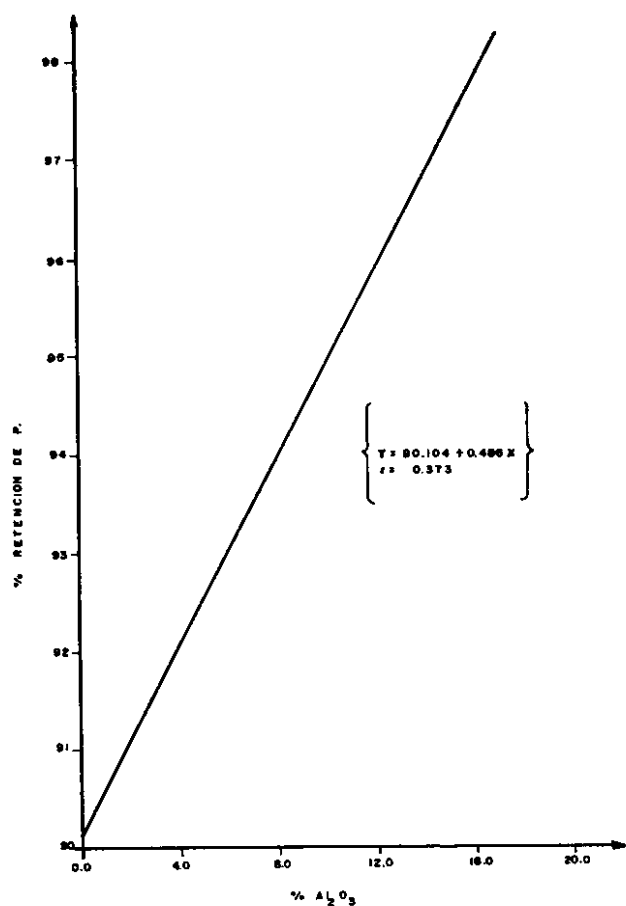


Figura 4. Relación entre la retención de fósforo y el contenido de aluminio en andosoles de la Sabana de Bogotá.

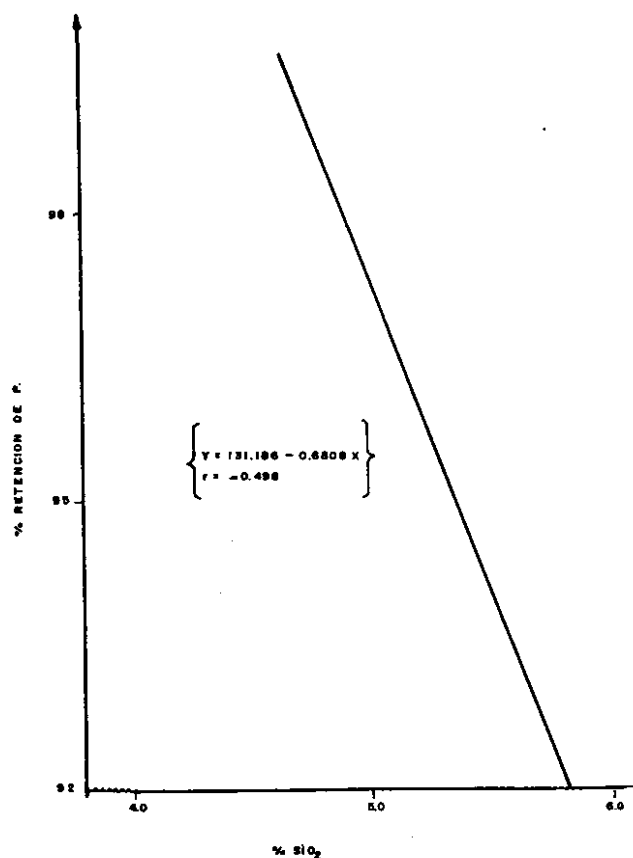


Figura 5. Relación entre la retención de fósforo y el contenido de sílice en andosoles de la Sabana de Bogotá.

dad de retención de fósforo. Según la Tabla 1, la aplicación de silicato de sodio en dosis de 25, 50, 100 y 200 p.p.m., presentó un efecto favorable en la disminución de la capacidad de retención y por ende en la disponibilidad de fósforo en el suelo.

TABLA 1

Capacidad de retención con y sin aplicación de silicato de sodio, en andosoles de la Sabana de Bogotá.

MUESTRA	SIN APLICAC. DE SILICATO SODIO	25 p.p.m. SILICATO DE SODIO	50 p.p.m. SILICATO DE SODIO	100 p.p.m. SILICATO DE SODIO	200 p.p.m. SILICATO DE SODIO
1	95.50	95.00	93.70	90.30	91.40
2	90.00	86.80	82.20	79.80	80.00
3	93.00	91.20	87.80	87.60	87.80
4	96.70	93.20	90.00	88.70	88.90
5	97.00	96.00	92.20	91.10	91.20
6	97.50	96.50	95.00	93.20	93.00
7	98.90	95.50	92.00	90.50	91.00
8	98.85	98.00	98.00	91.15	93.40
9	99.10	96.70	90.00	88.14	87.20
10	99.60	96.00	89.80	89.50	89.50
11	94.60	92.20	89.50	85.70	85.50
12	99.20	95.40	89.20	86.00	89.50

Teniendo en cuenta que esta serie de experimentos se llevó a cabo a nivel de laboratorio, sería de gran importancia realizar experimentos en el campo con diferentes silicatos para determinar el efecto en el rendimiento de los cultivos y el comportamiento de las variables físico-químicas respecto a la fijación de fosfatos.

En suelos con características similares a los estudiados, la aplicación de escorias Thomas (Calfos), podría ser una buena alternativa, ya que contienen silicatos, calcio y fósforo, elementos indispensables para incrementar los rendimientos en los cultivos.

2. Transformaciones del fósforo aplicado al suelo como fertilizante

Cuando se añade un fertilizante fosforado al suelo, los iones fosfato que se liberan por disolución, no permanecen en su forma original, sino que son objeto de transformaciones casi siempre debidas a fenómenos de adsorción y precipitación. La distribución de los fosfatos inorgánicos en el suelo depende del grado de meteorización y desarrollo de

los suelos (4). En suelos poco meteorizados (moli-soles), predominan los fosfatos cálcicos; en suelos derivados de cenizas volcánicas (andosoles), predominan los fosfatos unidos al aluminio y al hierro y en los suelos maduros (oxisoles), predominan los fosfatos ocluidos en los hidróxidos de hierro, aluminio y manganeso.

El pH es el principal factor químico que controla las transformaciones de un compuesto en otro. En la medida que los suelos sean más ácidos, las actividades del hierro y aluminio aumentan y los fosfatos de calcio relativamente solubles se convierten en fosfatos insolubles de hierro y aluminio. Por otra parte la descomposición de la roca fosfórica en suelos ácidos se debe a la presencia de los iones H^+ procedentes de la hidrólisis del Al^{3+} .

Bajo condiciones de invernadero y utilizando sorgo Dorado (*Sorghum vulgare*) como planta indicadora, se evaluó el efecto de aplicación de roca fosfórica y superfosfato triple en dosis de 100, 200, 300 y 400 Kg de P_2O_5 /Ha., en un andosol de la Sabana de Bogotá. Los resultados se compararon con un oxisol de los Llanos Orientales.

En la primera parte de esta investigación (11), se estudió el efecto de las dos fuentes fosfóricas sobre el rendimiento, disponibilidad y absorción de fósforo por la planta.

De acuerdo con los resultados obtenidos la mayor respuesta a la fertilización fosfórica (Fig. 6), se registró en el oxisol utilizando como fuente el superfosfato triple.

En cuanto al fósforo disponible, el andosol presentó contenidos muy bajos comparado con el oxisol y no presenta modificaciones sustanciales después de cada una de las cosechas por efecto de los niveles aplicados. Este comportamiento es debido a la alta fijación mostrada por este suelo.

Respecto a la absorción de fósforo por la planta, el andosol presentó pequeños incrementos comparado con el oxisol, el cual presentó una alta absorción cuando se aplicó superfosfato triple. En general se observó que existe una correlación entre el fósforo disponible del suelo, el absorbido por la planta y el rendimiento.

En la segunda parte de esta investigación (12), se consideró de especial interés evaluar las diferentes fracciones de fósforo, lo mismo que las transformaciones que sufren éstas después de dos cosechas consecutivas.

El efecto producido por la aplicación de superfosfato triple y roca fosfórica se muestra en la Fig. 7.

Después de la primera cosecha, el fósforo inorgánico predomina en ambos suelos (60.7% en el oxisol y 57.6% en el andosol). La contribución del P-

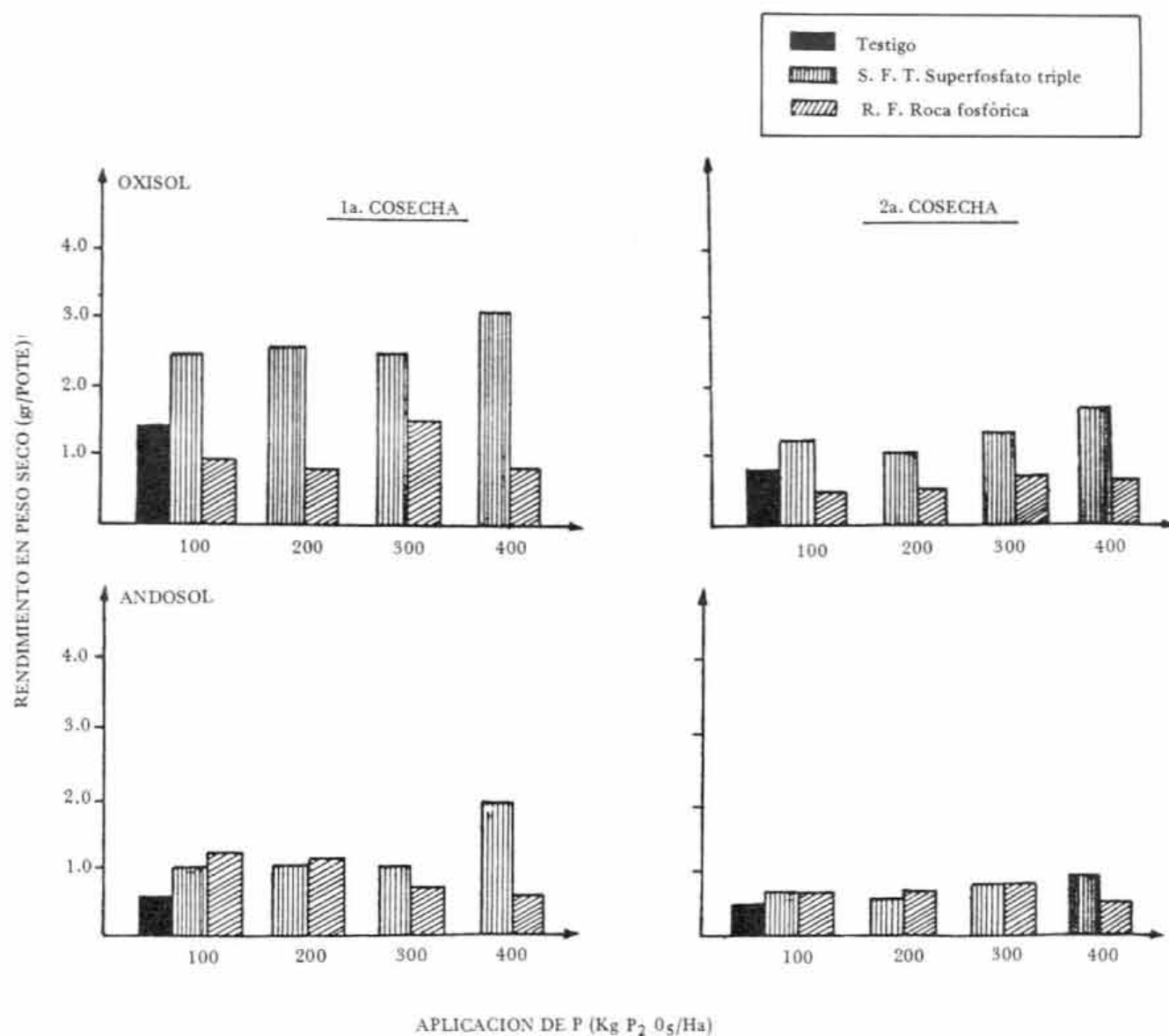


Figura 6. Efecto de las fuentes y niveles de fósforo sobre el rendimiento en peso seco en un andosol de la Sabana de Bogotá y un oxisol de los Llanos Orientales.

Ca es muy baja. Sobre la fracción P-inorgánico se nota un predominio de las formas P-Fe en el oxisol y P-Al en el andosol.

Después de la segunda cosecha, los tratamientos testigo muestran una disminución de la fracción P-Ca, lo cual hace suponer que la planta toma preferencialmente esta fracción. En el oxisol, la fracción P-Fe muestra un incremento, que es más marcado cuando se aplica superfosfato triple; la fracción P-Al en este suelo no sufre ninguna variación. Por el contrario, en el andosol la fracción P-Al se incrementa, mientras que la fracción P-Fe no sufre variación.

Este comportamiento nos confirma que la retención de fósforo se debe en gran parte a la actividad del aluminio en los andosoles y a la formación de fosfatos de hierro en los oxisoles.

3. Efectividad agronómica de la roca fosfórica en andosoles

La eficiencia de la fertilización fosfatada en suelos con alta capacidad de fijación de fósforo se estima en tan solo 10 a 20%, es decir, que para el caso de nuestro país, de las 80.000 toneladas métricas de P_2O_5 que se aplican anualmente, se estarían perdiendo de 64.000 a 72.000 toneladas métricas en el mismo lapso (6).

Con el fin de incrementar el fósforo aprovechable en estos suelos, es necesario aplicar grandes cantidades de fertilizantes, lo cual hace difícil justificar que los requerimientos de fósforo se suplan mediante el uso de superfosfato triple debido a su alto costo por unidad de fósforo y a su alta solubilidad en agua.

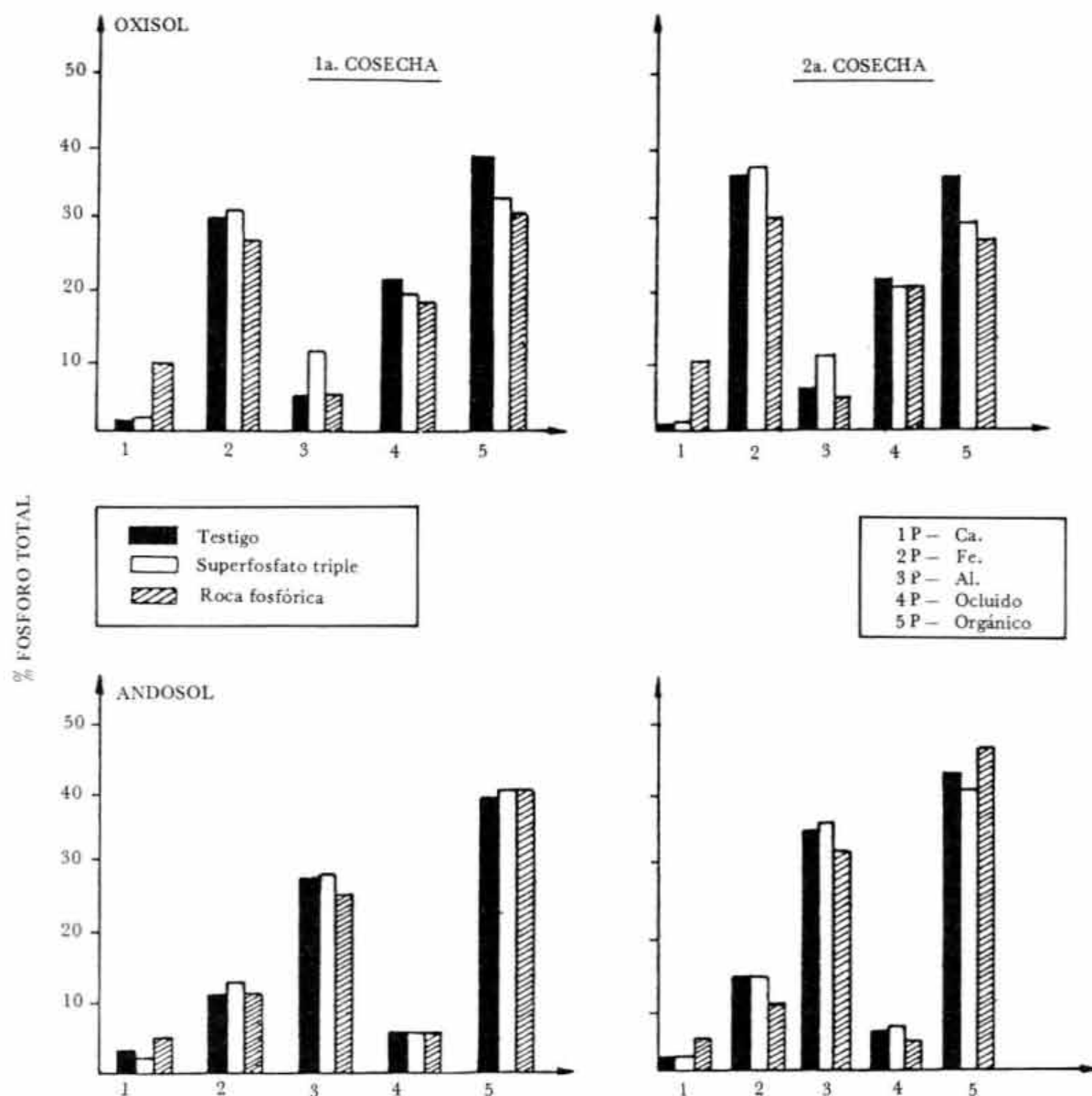


Figura 7. Efecto de dos fuentes fosfatadas sobre las fracciones de fósforo, en un andosol de la Sabana de Bogotá y un oxisol de los Llanos Orientales, después de cada una de las cosechas

Por lo tanto será necesario recurrir a fuentes de fósforo que tengan un precio más razonable, pero que sean agrónomicamente más efectivas. En nuestro país la roca fosfórica de Pesca (Boyacá), ha sido clasificada como de reactividad intermedia, lo cual hace interesante tratar de incrementar su actividad agronómica mezclándola con fertilizantes nitrogenados tales como urea, nitrato, sulfato y cloruro de amonio, de tal manera que al reaccionar en el suelo, se produzca acidez y se libere el fósforo presente en la estructura cristalina de la fluorapatita.

Teniendo en cuenta las razones anteriores, se evaluó mediante un ensayo de invernadero la efectividad de las mezclas roca fosfórica-fertilizante nitrogenado en un andosol de la Sabana de Bogotá (Serie Bermeo). Se comparó el rendimiento, la absor-

ción de fósforo por rabanito rojo (*Raphanus sativus*) y el efecto residual, con mezclas patrón utilizando superfosfato triple como fuente soluble de fósforo (7).

Rendimiento en materia seca (Fig. 8). Las mezclas roca fosfórica + fertilizante nitrogenado produjeron rendimientos muy inferiores a los obtenidos con las mezclas patrón en la primera cosecha. Sin embargo se destaca el rendimiento para la mezcla roca fosfórica + urea. En la segunda cosecha las mezclas roca fosfórica + fertilizante nitrogenado produjeron un incremento muy significativo con relación a la primera cosecha. Los máximos rendimientos correspondieron a las mezclas roca fosfórica + urea y roca fosfórica + nitrato de amonio. Por el contrario, los rendimientos para las mezclas patrón disminuyeron.

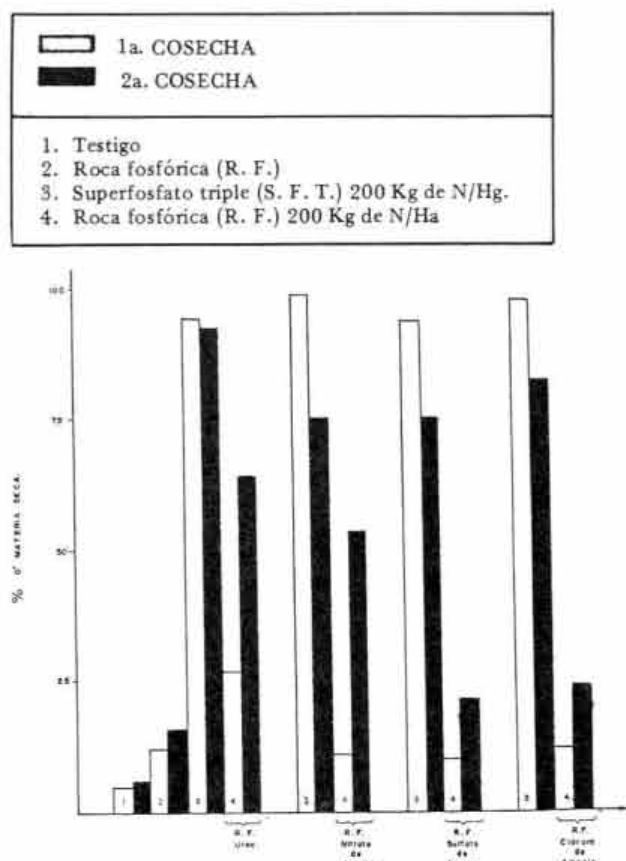


Figura 8. Efecto comparativo de las mezclas roca fosfórica + fuente nitrogenada en el rendimiento de *Raphanus Sativus*, en un andosol de Subachoque (Cundinamarca).

Fósforo absorbido (Fig. 9). En la primera cosecha la absorción de fósforo por la planta cuando

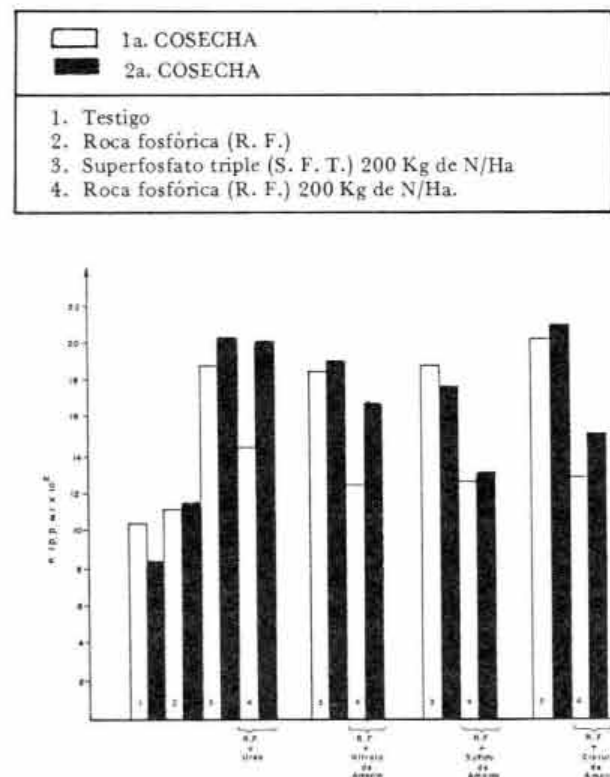


Figura 9. Efecto de los niveles y fuentes de Nitrógeno aplicadas con (R. F) roca fosfórica en la absorción de fósforo por *Raphanus Sativus*, en un andosol de Subachoque (Cundinamarca).

se emplearon las mezclas roca fosfórica + fertilizante nitrogenado, fue inferior a la que se presentó con las mezclas patrón. En la segunda cosecha hubo un incremento significativo para las mezclas roca fosfórica + urea y roca fosfórica + nitrato de amonio. En general se observó una correlación entre la absorción de fósforo y el rendimiento.

Efecto residual (Fig. 10). Después de las dos cosechas, el efecto residual de las mezclas roca fosfórica + urea y roca fosfórica + nitrato de amonio fue superior al de las mezclas patrón correspondientes. Mientras que el efecto de las mezclas roca fosfórica + sulfato de amonio y roca fosfórica + cloruro de amonio fueron, en promedio, equivalentes a las mezclas patrón correspondientes.

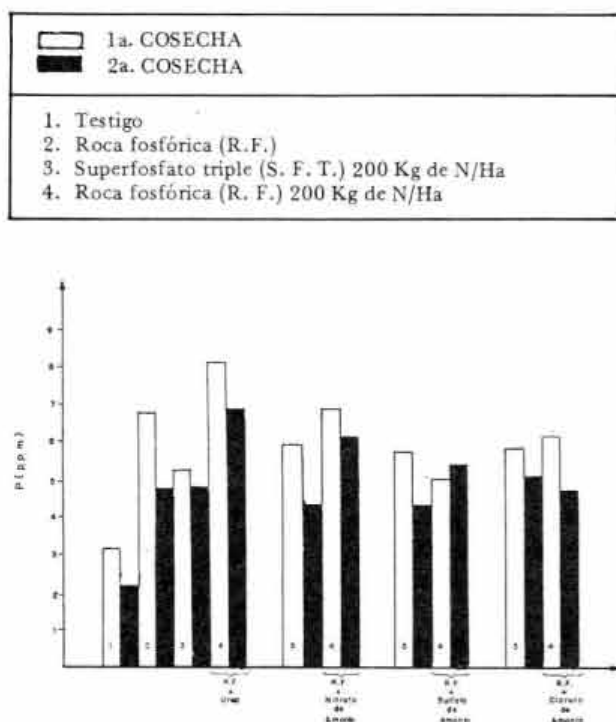


Figura 10. Contenido de fósforo extractable (BRAY II), después de cada cosecha —efecto residual— en un andosol de Subachoque (Cundinamarca).

Perspectivas de investigación

De las investigaciones presentadas en este trabajo y de otras realizadas en el país sobre estos temas, surgen algunas estrategias con el fin de desarrollar sistemas de manejo apropiados para estos suelos. Los principales componentes de estas estrategias podrían ser los siguientes:

- Combinación apropiada de métodos y dosis para estimular los efectos iniciales y residuales del fósforo.
- Estudios encaminados a disminuir la fijación mediante el encalado o adición de silicatos.
- Uso de fuentes de fósforo menos costosas como rocas fosfóricas combinadas con superfosfato triple o con fertilizantes nitrogenados.

- d. Selección de especies y variedades que puedan crecer bien en condiciones de bajos niveles de fósforo aprovechable.
- e. Exploración de las posibilidades prácticas de las asociaciones de micorrizas para aumentar la absorción de fósforo por las plantas.

BIBLIOGRAFIA

1. ALEXANDER, M. 1977. Introduction to soil microbiology Wiley-sons. New York, 467 p.
2. BESOAIN, E. 1972. Mineralogía de arcillas de algunos suelos volcánicos de Costa Rica. II Panel sobre suelos volcánicos. Pasto. Colombia.
3. ESPINOSA, A. 1975. Influencia de formas y dosis de silicatos en la capacidad de retención de fósforo en suelos de la Sabana de Bogotá (Serie Tibaitatá). Tesis de Grado. Departamento de Química. Universidad Nacional.
4. FASSBENDER, H.W. 1969. Estudio del fósforo en suelos de América Central. Capacidad de fijación de fósforo y su relación con características edáficas. Turrialba 19 (4): 497-505.
5. GUERRERO, R.R. 1972. Estado y fijación de fósforo en suelos volcánicos del sur de Colombia. Simposio Universidad de Pasto 36 p. (Mimeografiado).
6. ———. 1983. Los fertilizantes químicos, propiedades y comportamiento agronómico. Colección Punto Verde No. 4. Monómeros Colombo-Venezolanos.
7. HERNANDEZ, I. y R. AVILA, 1984. Efecto de la adición de urea, nitrato, sulfato y cloruro de amonio en la disolución de roca fosfórica aplicada a un suelo derivado de cenizas volcánicas. Tesis de Grado. Departamento de Química. Universidad Nacional.
8. LUNA, C. 1969. Aspectos genéticos de "andosoles" en Colombia. I Panel sobre suelos derivados de cenizas volcánicas de América Latina. Turrialba. Costa Rica.
9. MENGEL, K., y E.A. KIRBY. 1978. Principles of plant nutrition. International Potash Institute (Editor). Swizerland.
10. MUNEVAR, F. 1983. Principales procesos microbiológicos en el suelo y su función en la producción agropecuaria. Suelos Ecuatoriales. 13 (2): 7-18.
11. OJEDA, F., J. QUINTERO y R. LORA. 1980. Comportamiento del fósforo aplicado al suelo a partir de roca fosfórica y superfosfato triple en dos suelos colombianos. I Disponibilidad y absorción por la planta. Rev. Col. de Química 10 (1): 21-32.
12. ———. 1982. Comportamiento del fósforo aplicado al suelo a partir de roca fosfórica y superfosfato triple en dos suelos colombianos. II Efecto sobre las diferentes fracciones del fósforo. Rev. Col. de Química 11 (10): 1-9.
13. OSPINA, O. 1974. El fósforo en los andosoles. Suelos ecuatoriales 6 (1): 97-135.
14. QUINTERO, J. y F. BORIE. 1984. Solubilización in vitro de fosfatos orgánicos e inorgánicos por hongos del suelo. Suelos Ecuatoriales. 4 (1): 126-131.
15. SERVICIO GEOLOGICO NACIONAL. 1962. Mapa Geológico de Colombia. Minpetróleos. Colombia.