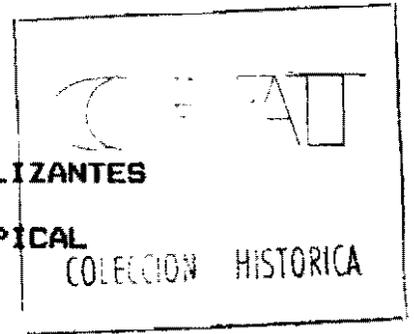


5570  
(4085)

S  
647  
-A 47

ALTERNATIVAS SOBRE EL USO COMO FERTILIZANTES  
DE FOSFATOS NATIVOS EN AMERICA TROPICAL  
Y SUBTROPICAL



Memorias

Editadas y Compiladas por:  
L.A. León y D. Arregocés

Impresas por: Unidad de Artes Gráficas del Centro  
Internacional de Agricultura Tropical, CIAT.  
Palmira, Colombia, S.A.

Con financiación del Centro Internacional de Investigaciones  
para el Desarrollo, CIID.

S  
647  
A47

CONTENIDO

Página

Información general sobre el Simposio L.A. León	5571 i ✓ (4086)
Introducción y recuento del Proyecto Fósforo IFDC/CIAT/CIID L.L. Hammond	5572 ii ✓ (4087)
I. Generalidades sobre los depósitos de fosfatos en América Latina.	6
1. Descripción y caracterización de los depósitos de fosfatos en América Latina V. Ricaldi y G.H. McClellan	7 ✓
2. Conversión de fosfatos de América Latina a fertilizantes A.H. Roy y J. Polo	21
3. Reacciones del fósforo en suelos tropicales S.H. Chien, L.A. León y L.L. Hammond	48 ✓ 5573 (4088)
II. Evaluación agronómica de fertilizantes fosfatados en América Latina	72
4. Aplicación directa de roca fosfórica en suelos de México. R. Nuñez	73
5. Evaluación de la eficacia de rocas fosfóricas como fuentes de fósforo para los cultivos en suelos de Costa Rica. G. Ramírez	99
6. Evaluación agronómica de la roca fosfórica "Capinota" en la Zona Andina de Bolivia R. Rico, F. Ausgtburger, J. Bellot y J. Villarroel	115
7. Eficiencia agronómica de la roca fosfórica en suelos de Colombia. J. Navas	135/
8. Evaluación agronómica de fertilizantes fosfatados en zonas altas de Ecuador. J. Espinosa, F. Valverde, J. Córdoba, V. Novoa y R. Vera	139 ✓

9.	Evaluación agronómica de fertilizantes fosfatados en las zonas altas de Suramérica. Perú. B. La Torre, A. Matos, F. Laura y H. Ingaroca	161
10.	Evaluación agronómica de fertilizantes fosfatados en Venezuela. E. Casanova	176
11.	Evaluación agronómica de fertilizantes fosfatados en el Cerrado Brasileiro W.J. Goedert, D.M.G. Souza E. Lobato y T.A. Rein	202
III.	Suministro de fertilizantes fosfatados en América Latina. Aspectos económicos.	221
12.	Alternativas de suministro de fertilizantes fosfatados. El caso de Colombia. A. Martínez	222
13.	Uso potencial de rocas fosfóricas y de rocas fosfóricas parcialmente aciduladas en la agricultura colombiana. A. Martínez, L.A. León y J. Navas	243
14.	Aspectos económicos del suministro y uso de fertilizantes fosfatados en América Latina C.A. Baanante	271
IV.	Uso de fertilizantes fosfatados en América Latina. Aspecto social.	284
15.	Patrones de manejo de suelos y uso de fertilizantes fosfatados entre productores de arroz en secano en el Meta, Colombia. E. de L.R. Hansen	285
	Participantes	317

5626  
(4089)

## Información General sobre el Simposio L.A. León

Desde 1977 el IFDC, el CIAT e institutos nacionales de investigación de Bolivia, Costa Rica, Colombia, Ecuador, México, Perú y Venezuela desarrollaron un proyecto cooperativo para identificar fuentes de fosfatos fertilizantes que sean efectivas, al ser usadas en los suelos ácidos de América Tropical. Los fondos del Proyecto fueron suministrados por el CIID del Canadá. Como éste Proyecto terminó en Octubre de 1987, se consideró importante el producir una publicación que resuma todos los resultados obtenidos durante los 10 años de investigación cooperativa.

Esta publicación será una herramienta útil para el personal de los países Andinos envuelto en la formulación de políticas agro-económicas, en el desarrollo de recursos domésticos y en la planeación en el sector de fertilizantes.

### Objetivos

El principal objetivo fue el de reunir a geólogos, ingenieros, científicos de suelos, agrónomos, economistas, sociólogos y representantes de institutos nacionales de investigación agrícola en América Latina que están comprometidos en la evaluación agronómica y económica de fertilizantes fosfatados y en su tecnología para:

1. Presentar y discutir los resultados de las investigaciones sobre la evaluación de fertilizantes fosfatados realizada por el Proyecto Fósforo IFDC/CIAT/CIID.
2. Definir e identificar las necesidades para una futura estrategia para evaluar productos fosfatados y tecnologías sobre el uso de éstos fertilizantes en los países Andinos.
3. Preparar una publicación sobre fertilización con rocas fosfóricas naturales o alteradas para los diversos ecosistemas y cultivos propios de los países Andinos.
4. Formular estrategias para el establecimiento permanente de una Red Latinoamericana de evaluación de fertilizantes fosfatados.

### Participación

El Simposio estuvo abierto para todos aquellos interesados en la fertilización fosfatada en América Latina. Los diferentes tópicos fueron todos presentados por científicos nacionales y de institutos internacionales, especialmente invitados.

**Introducción y Recuento del Proyecto Fósforo  
IFDC/CIAT/CIID  
L.L. Hammond**

La baja fertilidad de los suelos limita los rendimientos de muchos cultivos en los países en desarrollo. La deficiencia de fósforo particularmente es el principal obstáculo en el incremento de la producción de alimento para los pequeños agricultores de Africa y América Latina.

Si bien la comercialización internacional de fertilizantes fosfatados ha sido de gran ayuda la importación de éstos materiales a menudo crea serios problemas por la disponibilidad de divisas de los países más pobres y además por los altos costos de transporte de los puertos a los sitios de consumo. Muchos de los países atrapados en ésta situación tienen depósitos de rocas fosfóricas. Sin embargo muchos de éstos depósitos, permanecen sin explotarse, a veces, porque ellos son considerados como inapropiados para ser procesados y transformados en fertilizantes fosfatados.

Los investigadores en la sede central de el International Fertilizer Development Center (IFDC) en Muscle Shoals, Alabama, Estados Unidos, han provisto una solución al dilema.

La roca fosfórica molida, el más simple de los fertilizantes fosfatados, está siendo usado ampliamente, y dependiendo de la fuente, puede ser un fertilizante de primera clase en los suelos ácidos. Desafortunadamente, los diferentes depósitos de roca fosfórica varían ampliamente en su valor como materiales de aplicación directa; muchos son casi inútiles para los agricultores. Estas rocas deben ser tratadas químicamente para convertirías en fertilizantes útiles. Mediante la acidulación de éstas rocas nativas, es decir, usando sólo una porción de el ácido normalmente empleado para producir superfosfatos convencionales, los investigadores del IFDC han producido fertilizantes que a menudo producen una respuesta en el rendimiento similar a la de los fertilizantes fosfatados convencionales.

A través de éste trabajo, el IFDC está ayudando a los países de América Latina y Africa a encontrar la manera para desarrollar sus reservas de fosfatos y proveer los fertilizantes fosfatados necesarios a un costo razonable para producir alimento.

Durante los pasados 11 años, la investigación de campo en América Latina, con base en el Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT) en Cali, Colombia, han apuntado a la búsqueda de maneras efectivas de usar las reservas nativas de rocas fosfóricas para suplir las necesidades de fertilizantes fosfatados.

Una Red Cooperativa de ensayos de campo ha identificado las mejores prácticas de manejo tanto para la roca fosfórica molida como para la parcialmente acidulada, la cual a menudo, ha mostrado ser agronómicamente superior a la primera. Esta Red Cooperativa que incluye a Bolivia, Colombia, Costa Rica, Ecuador, México, Perú y Venezuela, ha demostrado que la roca parcialmente acidulada puede ser la ruta para un fertilizante fosfatado más barato pero tan efectivo como los convencionales de acidulación completa.

Investigaciones socio-económicas han encontrado la mejor manera de introducir entre los agricultores el uso de estos fertilizantes fosfatados producidos localmente. Como un resultado de este trabajo del IFDC en América Latina varias rocas fosfóricas están siendo ahora explotadas, molidas y vendidas a los agricultores para la producción agrícola.

Debido al trabajo del IFDC, gobiernos e investigadores están ahora concientes de sus fuentes nativas de fosfatos así como de su valor potencial en la producción agrícola y, lo que es más importante, de la necesidad de estudiar y evaluar las alternativas de producción disponibles.

**I. Generalidades sobre los Depósitos de Fosfatos en  
América Latina**

# 1. DESCRIPCION Y CARACTERIZACION DE LOS DEPOSITOS DE FOSFATOS EN AMERICA LATINA

Victor Ricaldi<sup>a</sup>  
Guerry H. McClellan<sup>b</sup>

## RESUMEN

En la corteza terrestre los minerales fosfáticos se presentan como accesorios en casi todas las rocas. Por alteración supergénica se forman minerales secundarios, cuyas menas se enriquecen por la acción de procesos de intemperismo que remobilizan al fosfato formando depósitos extensos. Los depósitos en la escala geológica están distribuidos desde el Precámbrico hasta el Terciario y se asocian a intrusivos plutónicos alcalinos y complejos alcalinos ultrabásicos, afectados también por eventos tectónicos grandes acaecidos en la tierra. Los depósitos sedimentarios o fosforitas tienen un origen no conocido totalmente; pero constituyen los depósitos más importantes de fósforo. El ascenso de corrientes frías ricas en fosfatos hacia zonas marinas de baja profundidad, es uno de los mecanismos más importantes para generar condiciones fosfogénicas ricas sobre extensas áreas marinas; otros factores son determinantes para la formación de estos depósitos tales como: la presencia de áreas de alta productividad orgánica, circulación oceánica, latitudes bajas de costas, tectónica de placas, desarrollo de los surcos marinos, variaciones del nivel del mar, etc. El guano es otra fuente de fósforo, con incidencia baja en la producción mundial de P. Las condiciones para su formación son limitadas por condiciones geológicas, humedad, poblaciones grandes de aves, zonas continentales y marinas ricas en nutrientes. Se describen los yacimientos fosfáticos más importantes en América Latina, su relación con los eventos geológicos acaecidos desde el Precámbrico y su ubicación. Intenta también mostrar la importancia de la exploración aún limitada que se tiene de la región y la urgencia de producir fertilizantes que incidan positivamente en la producción agrícola del continente.

### Introducción

El fósforo es un elemento vital para el crecimiento de las plantas y por lo tanto para el desarrollo de la agricultura.

---

<sup>a</sup>Association of Geoscientists for International Development.

<sup>b</sup>International Fertilizer Development Center.

Los países latinoamericanos, como otros países en desarrollo, encuentran obstáculos en la producción de alimentos esenciales para su subsistencia por las serias limitaciones económicas para la adquisición de fertilizantes fosfáticos; por otra parte, con excepción de algunos países, la mayoría no cuenta con producción doméstica de ellos. Este hecho se debe a que a pesar de la gran producción mundial de fosfatos, que permite una mayor oferta, los más grandes depósitos que cubren la demanda mundial están en tres países: Marruecos, Estados Unidos de América y la Unión Soviética.

En América Latina, que en conjunto es un gran importador de productos fosfáticos para cubrir sus necesidades agrícolas, aún observando que existe sobreproducción, se ha intensificado en esta última década, el estudio de depósitos ya conocidos y de nuevos prospectos por considerarlos recursos económicos. La necesidad de crear nuevos empleos, ahorrar divisas, independizarse de abastecedores extranjeros y protegerse de las variaciones en los precios, han despertado mayor interés en estos países en replantear sus políticas de investigación y evaluación de los depósitos fosfáticos que evidentemente requieren de análisis adecuados en su explotación, procesamiento y uso.

Uno de los más importantes esfuerzos internacionales al respecto es el iniciado por la Unión Internacional de Ciencias Geológicas bajo el denominado Proyecto Fosforita PICG 156, que básicamente trata de investigar aspectos relacionados con la génesis, edades y distribución de los depósitos sedimentarios marinos. Paralelo a este proyecto, algunos países latinoamericanos han establecido programas de exploración, explotación y tratamiento de los depósitos fosfáticos, como es el caso de las inversiones en los proyectos del desierto Sechura en Perú (US\$183 millones) y en Venezuela, Estado Táchira (US\$240 millones).

### Mineralogía

De acuerdo con la literatura antigua se mencionan más de 2.000 especies de minerales fosfáticos, de los cuales 300 son los más representativos. La combinación del radical  $PO_4$ , con otros elementos y las sustituciones iónicas posibles dificultan establecer fórmulas químicas únicas.

Los minerales fosfáticos contienen componentes ferroso-férricos (mayoritarios), Al, Ca, Mn y muchos minerales como componentes minoritarios, además de elementos raros como U, Th, etc. El fósforo que ocupa el décimo lugar en abundancia, se forma como mineral accesorio en rocas ígneas, metamórficas, pegmatitas y por alteración supergénica de fosfatos primarios.

En las rocas ígneas, los fosfatos primarios se presentan como el grupo apatita, relativamente insolubles en aguas alcalinas y neutras, que cambian en sus comportamientos al aumentar la acidez y disminuir la temperatura. Cuando la apatita se somete a los procesos de meteorización se concentra eventualmente en forma residual, en acción posterior forma los depósitos fosfáticos, que dependiendo del tipo de suelo en el cual se efectúa la descomposición, se vuelve a formar apatita en terrenos calcáreos, en terrenos ígneos contiene Fe y Al y en suelos arcillosos los depósitos fosfáticos son aluminicos. En la fase final de transporte a ambientes marinos se encuentra incluido en las arcillas, compuestos orgánicos disueltos o en solución, como también en hidróxidos de Al y Fe.

### Tipos de Depósitos

Los depósitos fosfáticos de interés económico se encuentran en:

1. Rocas ígneas
2. Rocas sedimentarias
3. Guaneras

Las apatitas ígneas se presentan en masas intrusivas ya sea en venas hidrotermales, diseminadas en la roca ígnea y en pegmatitas. Esta clase de depósitos en América Latina, se encuentran en Araxá y Jacupiranga, en el Brasil. El mineral característico es la fluorapatita con un contenido de hasta 36% de  $P_2O_5$ . Tanto la fluorapatita como la fluorapatita carbonatita forman productos minerales secundarios por removilización del fosfato o por lixiviación de componentes solubles como carbonatos, formando depósitos fosfáticos residuales.

Los depósitos ígneos apatíticos se extienden del Precámbrico al Terciario y se encuentran asociados a intrusivos alcalinos o complejos alcalinos ultrabásicos, además se relacionan estrechamente con eventos tectónicos grandes, particularmente en dos grupos definidos. Aquellos depósitos asociados con la deriva de los continentes africano y sudamericano y asociados al magnetismo cretácico.

Los depósitos residuales por intemperismo parecen estar asociados a ambientes tropicales, éste es el caso de las apatitas asociadas con los depósitos triásicos de Tapira y Araxá en Brasil.

Los depósitos de guano se presentan en bajas latitudes, no mayores de  $50^\circ$ , la formación de estos depósitos requiere de ciertas condiciones tales como presencia de calizas para la formación de cavernas o cuevas, temperaturas y humedad apropiadas. Los depósitos insulares requieren de poblaciones grandes de aves selectivas, áreas marinas

adyacentes ricas en nutrimentos para soportar una gran biomasa con consumo de aguas marinas ricas en fósforo y áreas insulares de condiciones climatológicas áridas o semiáridas.

### Depósitos Fosfáticos Marinos

Llamados también fosforitas, representan el 82% de la producción mundial de fosfatos. Las reservas alcanzan a los 200.000 millones de toneladas de roca fosfática con 30.000 millones de toneladas de  $P_2O_5$ .

Estos depósitos pueden formarse por:

- Ascenso divergente de aguas marinas en sedimentos lutíticos negros, dolomíticos, areniscos rojizos y depósitos salinos; los espesores máximos se registran en miogeosinclinales con sedimentación clástica y consiste de pellets y material calcáreo fosfático. En algunos casos cuando se forman en plataformas adyacentes estables contienen chert, calcáreo, areniscas de colores claros y lutitas. Sus contenidos de  $P_2O_5$  varían de 20% a 30%. Ejemplo de estos depósitos son Sechura, en Perú y del Cretácico, en Colombia.

- Corrientes de agua caliente a lo largo de la costa oriental forman sedimentos calcáreos y arenosos, con ausencia de lutitas, cherts. Son menos importantes que los anteriores; sin embargo, si estos depósitos son sometidos a procesos de intemperismo y enriquecimiento residual pueden convertirse en fuentes fosfáticas relevantes.

Áreas estables e internas continentales, son fuentes locales de fósforo por sus dimensiones, se asocian con calcitas, dolomitas, lutitas y areniscas glauconíticas, sus espesores son pocos metros y contienen de 5 a 15% de  $P_2O_5$ .

- Producto de una concentración y enriquecimiento por la acción de climas húmedos en calizas fosfáticas, que son los depósitos supergénicos.
- Disolución de la apatita por acción del agua ácida y precipitación del  $P_2O_5$  cuando la solución se pone en contacto con rocas aluminicas y ferrosas. Este tipo de depósitos, o de reemplazo, es irregular porque el fenómeno de reemplazo a través de las calizas tiene una mala distribución. Estos depósitos son de pequeñas dimensiones.

Las fosforitas en general son fáciles de distinguir cuando se encuentran expuestas, contienen pellets de forma

redondeada a ovoide y de tamaño de una arena, se encuentran también fragmentos calcáreos, la glauconita es un mineral común. El color de la pátina da indicios sobre el contenido de  $P_2O_5$ , así una pátina azul grisácea muestra una roca fosfática de alto grado. La presencia de uranio en corrientes de agua es un indicio de la presencia de fosfatos.

En resumen se puede afirmar que los mecanismos de formación de las fosforitas aún no son muy bien conocidos. Sin embargo, las corrientes profundas frías marinas ascendentes, ricas en fósforo, juegan un papel importante; las fosforitas en el pasado tuvieron varios mecanismos y métodos de formación que probablemente actúan todavía.

### Secuencia de Formación de Fosforita

La formación de las fosforitas se inicia con el desplazamiento de aguas ricas en nutrientes por ascenso en ambientes poco profundos (máximo 500 m), terrígena y clima árido caliente, luego se desarrolla la biota y se forman sedimentos basales orgánicos con pérdida de C, N e H, por los organismos muertos. El pH bajo y la alcalinidad alta del agua intersticial en los sedimentos basales, ocasiona la permanencia de concentraciones de fosfatos de restos orgánicos. Esta concentración provoca la fosfatización de los sedimentos o precipitación de apatitas en ambientes arcillosos, silíceos o calcáreos. Finalmente el retrabajado (sic) de sedimentos ocurrirá por eventos tectónicos y regresiones marinas. Los sedimentos granulares permanecerán y el material fino será eliminado formando depósitos de alto grado.

La ubicación geográfica de las fosforitas se relaciona con:

- a) Paleolatitudes menores a  $50^\circ$ .
- b) Tectónica de placas que producen: sedimentación continental, deriva de latitudes menores a lo largo de un eje este-oeste, desarrollo de evaporitas marginales durante la primera fase de separación de placas y ascenso dinámico asociado a un sistema de alta productividad.
- c) Separación máxima de la línea este-oeste, poco ascenso dinámico y baja proporción de nutrientes, dejando de ser atractiva en la fosfogénesis.

El ascenso de la plataforma marina podría ser uno de los mecanismos para el proceso fosfogénico de organismos y sobre grandes áreas.

Los episodios geológicos de formación de las fosforitas se resumen así:

Proterozóico Superior, 700 a 800 mil años.  
 Ordovícico, 464 mil años  
 Cretácico Superior-Eoceno, 65 mil años  
 Mioceno-Plioceno, 14 mil años

### Los Depositos Fosfáticos en America Latina

#### **Argentina**

La prospección de rocas fosfáticas se inició en 1970 a cargo del Servicio Minero Nacional, con un plan denominado "Fosforita" que hasta la fecha ha identificado 18 cuencas o áreas de sedimentación (continentales y marinas) con manifestaciones fosfáticas.

Las anomalías descubiertas se encuentran en sedimentos desde el Paleoceno (Sierra Septentrional), Provincia de Buenos Aires, en el Ordovícico (Provincia Jujuy), Eodevónicos (Sierra Grande), Jurásico (Formación Cañada-Asfalto), Triásico (Subcuenca de Cachenta), Eoterciario (Región Salamanca y Río Chico) y Eoceno-Mioceno (Formación Patagónia).

Dichas anomalías aún no son consideradas como yacimientos porque no ofrecen perspectivas económicas inmediatas, sin embargo, se continúan estudios prospectivos en otras áreas. Las apatitas se presentan como mineral accesorio de la pegmatita; se produce fósforo en la planta de hierro de Sierra Grande, donde se procesa magnetita como mina de hierro con contenido de 3.2% de  $P_2O_5$ .

Los desmontes de Sierra Grande con 36% de  $P_2O_5$  son considerados desde 1982 como una fuente para la fabricación de fertilizantes fosfatados.

#### **Bolivia**

Los estudios geológicos en Bolivia para detectar anomalías fosfáticas se han concentrado en las exposiciones del Ordovícico en la Cordillera Oriental, expuesta desde la frontera con Argentina, hasta los límites con Perú. Dichos estudios han detectado presencia de fosforitas en sedimentos marinos, en lentes muy reducidos en ancho y extensión, en localidades como Izcayachi (Tarija), Betanzos (Potosí), Capinota (Cochabamba) y Caranavi (La Paz), siguiendo en lineamiento norte-sur.

La más importante parece ser de Capinota, que muestra 37 horizontes con espesores de 0.7 a 1.5 m y promedio de 25%. Las reservas de roca fosfórica se estima en 2.8 millones de toneladas con 1.2 millones de toneladas de  $P_2O_5$ .

En estudios recientes en el oriente boliviano, dentro del Proyecto Precámbrico realizado entre el Servicio Geológico

de Bolivia y el Servicio Geológico Británico se han detectado carbonatitas silicificadas de edad Cretácica (Cerro Manomo) de 100 m de ancho y forma lenticular. Estos depósitos ígneos apatíticos tienen desde 23 a 25% de  $P_2O_5$ , no se tiene estimaciones de reservas. En cambio en áreas cercanas al Brasil (laguna Mandiore) se han descubierto depósitos fosfáticos que aún no cuentan con información geológica-económica completa, pero que se estima alcanzan a los 20 millones de toneladas de roca fosfórica.

## Brasil

Brasil es el más importante productor de fosfatos de los complejos carbonatíticos que se presentan en su territorio.

### Depósitos Primarios

Las manifestaciones ígneas se presentan en apatitas diseminadas en carbonatitas correspondientes principalmente al Cretácico Inferior a Superior y Terciario Inferior.

La mina Tapira ubicada en Mina Gerais tiene reservas geológicas estimadas en 710 millones de toneladas con tenor de 8.6% de  $P_2O_5$ .

La mina Jacupiranga en el Estado de Sao Paulo, explotaba originalmente la zona intemperizada con contenidos de minerales insolubles incluyendo apatitas. Posteriormente, después del agotamiento de estos depósitos residuales, se comenzó a explotar la roca carbonatítica con reservas de 150 millones de toneladas de 5% de  $P_2O_5$ .

Además de Jacupiranga se prospectaron 3 depósitos de importancia, Serrote, Guaviruva e Ipanema con reservas de 117 millones con 6.7% de  $P_2O_5$ .

En otros estados como Alagoas, Paraíba, Río Grande do Norte, Ceara y Pará se encuentran fosfatos en rocas carbonatíticas alcalinas y esquistosas.

### Depósitos Secundarios Residuales

Son depósitos relacionados directamente con yacimientos primarios carbonatíticos que han sido sometidos a intemperismo y posterior enriquecimiento de carbonatos. Entre los depósitos más importantes se mencionan a Araxa, Tapira, y Catalao con reservas de 243 millones de toneladas con 5% de  $P_2O_5$ . Otros depósitos ígneos residuales importantes son Anitapolis en Santa Catarina con reservas de 54 millones de toneladas de mena residual de 8.2% de  $P_2O_5$  y de 207 millones de toneladas de mena primaria con 5.9% de  $P_2O_5$ .

## Depósitos Sedimentarios

Los depósitos sedimentarios marinos más representativos son los de Patos de Minas en Mina Gerais y Olinda en Pernambuco. Patos de Minas es el depósito sedimentario más grande del Brasil, se presenta como lentes de 500 m de largo y 8 m de espesor. En Pernambuco los depósitos Cretácicos se estiman en 100 a 120 millones de toneladas con 20% de  $P_2O_5$ . El depósito Olinda se ha dividido en 3 áreas: Forno de Cali, Fragao y Paulista con presencia de capas fosfóricas oolíticas en asociación con sedimentos calcáreos arenosos. El contenido de fosfato fluctúa entre 10-27%, las reservas estimadas alcanzan los 50 millones de toneladas. Se conocen la presencia de fosfatos en Goais, Bahia, Paraíba, Rio Grande do Norte y Ceara.

Otro tipo de depósito fosfático con menor importancia son los depósitos de guano en las costas principalmente del Estado de Pernambuco y varias islas a lo largo de la costa atlántica con una reserva de 600.000 toneladas con 12.3% de  $P_2O_5$ . Presencia de fosfatos en lavas y tufas volcánicas se encuentran en Mina Gerais, las muestras dan contenidos entre 1.2-7.4% de  $P_2O_5$ .

## Chile

La principal fuente de fosfatos proviene del guano rojo y blanco extendidos en innumerables islas y áreas costeras. La diferencia entre ambos guanos está en el contenido de nutrimentos así:  $P_2O_5$ , rojo 21.6% y blanco 9.4%; N, rojo 1.7% y blanco 17.1%; CaO, rojo 22.4% y blanco 9.3%. Las reservas de guano rojo no sobrepasan el millón de toneladas y las principales áreas guaneras no son explotadas a pesar de la última ley (1983) que lo permite.

Depósitos fosfáticos apatíticos presentes en lutitas y venas en Coquimbo y Atacama, se asocian con los batolitos granodioríticos y los depósitos ferrosos existentes. Las operaciones mineras han cesado debido a la política de subvenciones del gobierno a los fertilizantes, sin embargo, sus reservas se estiman en 500.000 toneladas de 20% de  $P_2O_5$  y 2 millones de toneladas con 10% de  $P_2O_5$ .

Otros depósitos pequeños se encuentran en el sur del país en una franja de 160 km, entre Las Perdices y Lagunillas. Sedimentos marinos fosfáticos del Terciario se presentan en Mejillones, Bahia Inglesa-Caldera y Bahia Tongoy; los depósitos fosfáticos contienen capas diatomíticas arenosas y de tiza en estratos inclinados suavemente, los recursos son limitados y de bajo grado.

Sin embargo, estudios prospectivos en la parte central de la península de Mejillones dieron resultados con 56 millones de toneladas de 6% de  $P_2O_5$  con posibilidades de explotación a

tajo abierto. Otro depósito, menor que el de Mejillones pero de mucho interés fue descubierto en Bahía Inglesa con 1 millón de toneladas de 18% de  $P_2O_5$ , y finalmente el de Bahía Tongoy con 1 millón de toneladas del 15 al 18% de  $P_2O_5$ .

### Colombia

Las exposiciones de sedimentos en la Cordillera Oriental en el Departamento de Putumayo son importantes exponentes de depósitos fosfáticos. Otras investigaciones cerca a Pesca condujeron al descubrimiento de fosfatos en la Formación Guadalupe con reservas de 6 millones de toneladas de 21% de  $P_2O_5$  y La Azufrada con 1 millón de toneladas de 24%.

Las investigaciones en Colombia se realizaron en sedimentos Devónicos, Carboníferos, Cretácicos y Jurásicos, de las cuales los más significativos se encuentran en el Cretácico. La formación más sobresaliente es La Luna, expuesta en la Cuenca de Maracaibo y en la Formación Valle Medio del Magdalena, estas formaciones intercalan con lutitas negras, areniscas y cherts. En la Formación Valle del Magdalena, horizontes fosfáticos en Pesca-Alto de la Conejera contienen reservas de 84 millones de toneladas. El buzamiento de los estratos entre 20° y 30° y espesores de 2 a 4 m con promedios de 20% de  $P_2O_5$ , limitan su explotación a minería subterránea. Otros horizontes fosfáticos de espesores variables y composición química variable suman 32.6 millones de toneladas de contenidos entre 15 al 17% de  $P_2O_5$  (Las Vanegas-El Conchal y La Azufrada). El área de Sardinata en el Valle de Maracaibo presenta fosfatos en espesores de 0.5 a 3.5 m y profundidades de 0.5 a 5 m, sus contenidos alcanzan a 27% de  $P_2O_5$ .

Las rocas fosfáticas de alto grado se encuentran reducidas a la Cordillera Oriental, parte oriental de la Cordillera Central y los Departamentos de Santander, Boyacá, Cundinamarca, Tolima y Huila con un total de reservas de 744 millones de toneladas. En el Valle Superior de Magdalena en la Formación Monserrate del Cretácico Superior, con secuencia arenosa de 190 m de espesor y contenidos de 5 a 31%. El área Teruel-La Juanita contiene reservas de 17 millones de toneladas de 28% de  $P_2O_5$ .

Al Sudeste de Sardinata Lourdes se presentan depósitos similares a los depósitos del Valle de Maracaibo, con dos horizontes fosfáticos de 3.5 m de espesor y leyes de 20% de  $P_2O_5$ . El potencial se estima en 10 millones de toneladas. Otros depósitos en Tibu Orú y el de Granalate-Salazar al Oeste de Cúcuta contienen más de 9 millones de toneladas con grados entre 8-27% de  $P_2O_5$ . Finalmente depósitos pequeños en basaltos vesiculares contienen una reserva de 453.000 toneladas y se encuentran por debajo de las islas volcánicas de Malpelo.

## Ecuador

El conocimiento del potencial fosfático del Ecuador aún es insuficiente. Sin embargo, la Formación Napo del Cretácico Superior que está representado predominantemente por alternancia de lutitas y areniscas calcáreas, expuestas en la Cordillera Oriental, contienen roca fosfórica en pellets (Río Coca-Río) con espesores de 0.7 a 1.4 m con 25.2% de  $P_2O_5$ . En 1984, siete zonas fueron descubiertas, de las cuales 4 están localizadas entre la carretera Quito-Lago-Agrio. Las reservas estimadas son de 166 a 205 millones de toneladas con 25 a 35% de  $P_2O_5$ . También, existen depósitos de guano con porcentajes de 14 al 20% de  $P_2O_5$ .

## México

Existen varios depósitos de fosfatos en pequeña escala, pertenecientes al Jurásico y Cretácico (Zacatecas). En el Mioceno (Baja California), se descubrió recientemente un gran depósito de fosfatos de bajo grado, incrementando la producción en más de 500.000 toneladas (1985).

Los depósitos jurásicos son importantes por su grado y reservas, así en el Jurásico Superior se encuentran depósitos calcáreos de 4 tipos, de los cuales el fosfato calcáreo es el más importante con reservas de 77.4 millones de toneladas y ley de 18.4% de  $P_2O_5$  y 76.4 millones de toneladas de 13.3% (Zacatecas y Coahuila).

En Sierra de Santa Rosa el mineral fosfático es la apatita criptocristalina concrecionada, sus reservas alcanzan a los 13.5 millones de toneladas con 11% a 21% de  $P_2O_5$ . En el Jurásico Medio la Sierra de la Carbonera presenta fosfatos calcáreos interestratificados con reservas de 7.8 millones de toneladas de 19.9% de  $P_2O_5$ . El Mioceno y Plioceno presentan los depósitos fosfáticos más importantes de México. Las reservas en Baja California, Santa Rita y Bahía Magdalena alcanzan a 4.000 millones de toneladas. La secuencia más representativa de la Formación Monterrey se presenta en Arroyo San Hilario con 4 m de espesor y con reservas de 841 millones de toneladas de 14% de  $P_2O_5$ .

En San Juan de la Costa se estiman reservas de 24 millones con 18% de  $P_2O_5$ , este depósito está en producción, además tiene 16 millones de toneladas de bajo grado.

El depósito de Santo Domingo en la costa occidental alcanza a 434 millones de toneladas con 4.3% de  $P_2O_5$  y 643 millones con 4.6%. La explotación del yacimiento que se inició con un volumen de producción anual de 1.5 millones de toneladas fue suspendido en 1985 por problemas técnicos en la operación de explotación.

## Perú

El depósito más importante se encuentra en el desierto de Sechura constituido de fosforitas intercaladas con diatomitas deficientes en fluorina. Su deposición tuvo lugar entre el Eoceno y el Plioceno en un área de 2.000 km<sup>2</sup> entre los Andes y la costa. En la parte occidental del desierto los estratos fosfáticos tienen espesores de 134 a 215 m dentro de los pellets fosfáticos, con menores contenidos de nodulos fosfáticos, los horizontes superiores tienen espesores de 4.5 a 35 m. Separados por areniscas de las fosforitas inferiores por diatomitas, sus espesores son de 36 a 49 m.

Las reservas potenciales del desierto de Sechura se estiman en 10.000 millones de toneladas, de las cuales se tiene mejor conocimiento de la parte Sudoeste, por los trabajos que se realizan y alcanzan a 250 millones de toneladas con 30.5% de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>. El sistema de explotación es tajo abierto con una capacidad de producción de 1.5 millones de toneladas/año.

Para 1987 se proyectaba una inversión de 183 millones de dólares para explotar el Sechura en el área Diana, considerada la más rica de las tres zonas y la de mayor espesor (35 a 40 m), con 7-8% de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>.

Depósitos menores se encuentran en rocas sedimentarias en varias regiones de la costa. En la Formación Pasco del Mioceno se presentan nodulos fosfáticos (Provincia ICA) de 11 a 21% de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>. En los Andes se encontraron fosfatos jurásicos y cretácicos con leyes menores al 3% de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>. Se requieren estudios más detallados de la Formación Pucara del Jurásico entre el Lago Junín y Huancayo, que consiste de lutitas bituminosas negras, chert y calizas con contenidos de 5 a 20% de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>.

El guano fue en épocas pasadas importante para la producción de fósforo en el Perú, registrándose en 1956 una producción de 336.000 toneladas procedentes de 50 grupos de islas y penínsulas a lo largo de la costa. En la actualidad esta producción ha declinado considerablemente.

## Venezuela

Los depósitos más importantes de Venezuela se encuentran en sedimentos de edades Cretácicas y Miocénicas (Terciarias).

Los depósitos cretácicos se encuentran en areniscas blancas de la Formación Navay aflorantes en los Estados Táchira, Mérida y Zulia. Estas areniscas son equivalentes a la Formación La Luna y se presentan en horizontes fosfáticos silicios que varían en espesor entre 3 a 12 m. Las reservas se estiman en 80 millones de toneladas al Sudeste de Táchira. Algunos cuerpos aislados en los Monos contienen 22 millones de toneladas del 16% de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>.

Las fosforitas negras de la Formación La Luna se presentan como capas de calizas, lutitas y cherts de color oscuro. Esta formación es importante en Lobatera (264 millones de toneladas), Corzo, La Molina y las Hernández. En la región de Chigura y Jaji en el Estado Mérida se han encontrado importantes reservas de rocas fosfórica-glaucóníticas alcanzando 70 millones de toneladas; en Zulia se estiman en 15 millones de toneladas de 11% de  $P_2O_5$ , en las localidades de Machique y El Paraíso, con excelentes prospectos de incrementar sus reservas.

Al Sudeste del Estado de Falcón los depósitos miocénicos se presentan en forma de cadena en dirección general Este-Deste entre Riecito - Lizardo (producción de 500.000 toneladas/año de 33% de  $P_2O_5$ ). Los estratos son calcáreos y dolomíticos con espesores de 135 m y afectados por fallamiento. Contienen reservas de 50.000 a 20 millones de toneladas. Regionalmente se estiman reservas de 45 millones.

### Conclusiones

América Latina representa una importante fuente de productos agrícolas debido a sus condiciones favorables de suelo, agua y clima. La demanda de  $P_2O_5$  es grande para asegurar sus programas agrícolas.

Excepto Brasil, Perú, Colombia, México y Venezuela que poseen considerables yacimientos fosfáticos, los demás países se enfrentan a problemas de varios tipos, desde condiciones geológicas, mineras, metalúrgicas y de infraestructura pobres hasta la poca asistencia económica para establecer industrias locales.

Por lo tanto, es necesario orientar mejor las políticas de fomento de producción de fosfatos teniendo en cuenta lo siguiente:

1. Determinar mejor el potencial económico de los depósitos fosfáticos bajo criterios geológico-económicos razonables.
2. Definir mejor las condiciones de reserva de los depósitos o yacimientos de acuerdo a criterios técnicos y geológicos.
3. Teniendo en cuenta los potenciales estimados y reducidos de muchos depósitos en América Latina, es necesario estudiar operaciones mineras a escala pequeña (50.000 a 100.000 toneladas/año).
4. Los costos de explotación deben considerar métodos donde la mano de obra sea importante, pudiendo complementarse con plantas de reducida capacidad.

5. La actividad agrícola local es importante para una producción local que elimina costos de transporte.
6. Además del procedimiento convencional de acidulación se deben investigar procesos mecánicos de recuperación más simples para aplicación directa, especialmente a suelos ácidos y dirigidos a minería de pequeña escala.

## REFERENCIAS

- Utter, T. and F. Cediol. 1986. Geology and Mining Potential of Phosphorites in the Northeastern Andes (South America). *Erzmetall* 39 No. 9.
- McClellan, G.H.; F.N. Saavedra and M. Cooper, 1982. Characteristics of some Latin American Phosphorites. First Meeting of the Southern Hemisphere on Mineral Technology, Rio de Janeiro, Brazil.
- World Survey of Phosphate Deposits. 1987.
- IGDP Project Examines Phosphate Deposits. 1986, *Geotimes*.
- Ki, K.H. and W. Burnett. 1986. Uranium Series Growth History of a Quaternary Phosphatic Crust from the Peruvian Continental Margin. *Chemical Geology* 58.
- Vera, R. 1980. La Fosforita Uranifera Rio Chingual, Prov. de Napo. Escuela Politécnica Nacional, Ecuador.
- Burnett, W.; M.J. Beers and K.K. Roe. 1982. Growth Rates of Phosphates Modules from the Continental Margin of Perú. *Science*, Vol. 215.
- Burnett, W. and A.I.N. Lee. 1980. The Phosphate Supply System in the Pacific Region. *Geojournal* 45.
- Burnett, W. and K. Roe, 1983. Upwelling and Phosphorite Formation in the Ocean.
- Mastandrea, O.H.A. Leanza et al, 1982. Prospección de Fosfatos Sedimentarios en la Rep. Argentina. *Actas III*.
- World Phosphate Resources, with particular References to Potencial Low Grade Ores. 1986. *Transactions*.
- Los Depósitos Fosfáticos de Sud América. 1985. Ed. Victor Ricaldi, GLIRF.

## 2. CONVERSION DE FOSFATOS DE AMERICA LATINA A FERTILIZANTES

Amitana H. Roy\*  
Jorge R. Polo\*

### RESUMEN

América Latina es una región importadora de fertilizantes fosfatados; su producción de fertilizantes creció a una tasa del 7.1% durante los últimos 10 años; tasa mayor al doble del promedio mundial. Sin embargo, América Latina produjo sólo el 3.4% del fosfato mundial, mientras consumía el 7% del total. La presencia de las materias primas requeridas ofrece la oportunidad de establecer industrias productoras de fertilizantes fosfatados y con ellas mejorar las economías de los países Latinoamericanos. Las rocas fosfóricas de sus depósitos varían en concentración de  $P_2O_5$ , reactividad y calidad y requieren por lo tanto diferentes técnicas de procesamiento. Cada una de las técnicas sin embargo, tiene ventajas y desventajas sobre los efectos agronómicos del producto obtenido y sobre la economía de la producción. Durante los últimos 12 años, el IFDC ha obtenido amplia experiencia en la escogencia y el desarrollo de los procesos adecuados para las rocas Latinoamericanas. En este documento se discuten ejemplos de técnicas alternas de procesamiento, junto con sus ventajas, desventajas y costos de producción. En todos los casos el objetivo principal es el de proveer fertilizantes de bajo costo a los agricultores.

### Introducción

El programa de fosfatos del International Fertilizer Development Center (IFDC) ha puesto especial énfasis en dar asistencia a países en desarrollo en la evaluación y uso de sus depósitos nativos de roca fosfórica, particularmente aquellos localizados en países mediterráneos o en áreas remotas donde los costos del transporte hacen la importación de los fosfatos extremadamente costosa.

Además, se ha orientado el énfasis hacia aquellos depósitos que son de calidad marginal y que no son adecuados para la

---

\*Ingeniero especial de Proyecto y Coordinador de Ingeniería, División de Tecnología de Fertilizantes, International Fertilizer Development Center, Muscle Shoals, Alabama 35662.

producción de fertilizantes fosforados por procedimientos convencionales. Las metas propuestas son desarrollar productos que inicialmente mejoren la materia prima y que sean de uso eficiente, particularmente para los trópicos y sub-trópicos.

Los países en desarrollo tienen varias razones para abrir sus nuevos depósitos aun cuando esto signifique un exceso de abastecimiento en el mercado mundial. Hay un deseo natural de ser independiente de las fuentes foráneas; estos países no han olvidado la lección aprendida durante el período de escasez de 1973/74 cuando ellos estaban a merced de los proveedores internacionales. La producción doméstica también puede mejorar ahorrando divisas de alto valor e incrementando el empleo local. Aunque los precios en el mercado mundial han declinado, ellos aún se mantienen más altos que los niveles previos a 1973, y los préstamos internacionales de dinero tienen intereses "inflados" que aumentan los costos. El transporte es el factor que más afecta el costo de la materia prima. El costo del transporte para las menas indígenas puede ser más bajo que para las rocas importadas y no está sujeto a las variaciones de las tarifas de los fletes internacionales.

El efecto combinado de estos factores usualmente justifican lo deseable y económico de la utilización de los depósitos nativos. Muchas de estas consideraciones no son limitantes en los países en desarrollo, sin embargo estos países son el principal interés del IFDC.

El uso de fosfatos en América Latina aumentó a la tasa de 3.9% por año durante la pasada década hasta un total de 2.3 millones de toneladas métricas, pero sólo participó del incremento del total mundial del 6% establecido en 1976 a sólo el 7% en 1986. El uso de fosfato por hectárea en América Latina fue 10.2 kg/ha durante 1984. Sin embargo, la producción de fosfatos en la región creció a una tasa anual de 7.1% durante los pasados 10 años, más que el doble del promedio mundial. A pesar de todo, América Latina produjo solamente 3.4% del total mundial durante 1986 o sea un total de 1.7 millones de toneladas. Así, esta región es por completo un importador de fertilizantes fosfatados. Esta situación, combinada con un rápido incremento de las necesidades y la presencia de la mayoría de las materias primas, proveen una oportunidad a los países de América Latina para establecer industrias productoras de fertilizantes fosfatados y con esto ayudar a mejorar sus economías, las cuales dependen en gran medida de la agricultura. Este documento examina la posible ruta del proceso para convertir fosfatos nativos a fertilizantes con especial referencia a las minas de América Latina.

## Alternativas para Producir Fosfatos para América Latina

La roca fosfórica tiene muchos usos y alrededor del 85% de la producción total es para la fabricación de fertilizantes, incluyendo la aplicación directa al suelo (IFDC, 1979). Como fertilizante, el uso de fosfatos ha progresado desde harina de hueso a roca finamente molida, a productos de roca acidulada, a varios fosfatos termales, y finalmente a los productos modernos de alto análisis solubles en agua. Cada progreso, sin embargo, se ha caracterizado por la complejidad del proceso y menor tolerancia en el contenido de impurezas de la roca. Desde el principio de los años 30, los avances en la tecnología minera y de beneficio han provisto a la industria con materia prima de bajo contenido de impurezas en los cuales se basa la presente generación de compuestos fosfatados solubles en agua. Tales fertilizantes de alto análisis poseen ventajas en los costos de transporte y distribución sobre los de más bajo grado o productos menos solubles; consecuentemente el volúmen actual de fertilizantes fosfatados en el mundo es abastecido con fertilizantes de alto análisis. Fertilizantes químicos y termales en forma sólida, son producidos por varios tratamientos, y aunque se han hecho muchos productos, pocos de estos se han consumido como fertilizantes fosfatados (Cuadro 1).

Cuadro 1. Ejemplos de fertilizantes fosfatados populares en uso

Fertilizante fosfatado	Contenido de $P_2O_5$ (%)
Fosfato diamónico	46-48
Fosfato monoamónico	50-55
Superfosfato triple	46-48
Superfosfato simple	16-22
Nitrofosfato	15-30
Roca fosfórica	26-33

En la mayoría de los países de América Latina, el superfosfato simple (SFS) ha sido el fertilizante fosfatado tradicional. Sin embargo, en años recientes la disponibilidad de superfosfato triple (SFT), fosfato monoamónico (MAP) y fosfato diamónico (DAP) y otros fertilizantes compuestos (NF o NPK) han disminuido la

importancia del SFS. A pesar de todo, el SFS se continúa usando en compañía con otros fertilizantes especiales que son fabricados por requerimientos específicos de cierto tipo de cultivos.

En América Latina se han identificado suficientes recursos de fosfatos (Cuadro 2) para autoabastecerse en la producción de fertilizantes. Sin embargo, solamente, los depósitos grandes y de fácil acceso son explotados para el consumo local. Las pequeñas fuentes de materia prima de fertilizantes en áreas aisladas o en países mediterráneos están en varios estados de estudio, desarrollo y explotación. A menudo estos depósitos tienen desventajas económicas significativas, que incluyen el alto costo del transporte, lo cual limita el uso de la mina y sus productos para su envío al mercado doméstico. La expansión de la producción de alimento en América Latina requerirá la expansión de la industria de fertilizantes para que pueda asegurar un abastecimiento sostenido y sin interrupción. El uso óptimo del fertilizante más apropiado es una de las maneras más barata y efectiva de incrementar la producción de alimento.

### Aplicación Directa

La aplicación directa de roca fosfórica finamente molida puede ser una de las maneras más baratas de suministrar fósforo a los cultivos en los trópicos y subtropicos. En algunos casos la roca finamente molida es tan efectiva como el fertilizante fosfatado soluble más caro, mientras que en otros el potencial total de la roca no se alcanza dentro de un tiempo dado, a menos que algún fosfato soluble sea añadido, ya sea mezclado con la roca o derivado de la roca por acidulación parcial.

A causa de que el valor de la agricultura es impredecible, el uso de rocas fosfóricas para aplicación directa ha estado sujeto a mucha controversia. Muchos factores contribuyen a esta impredecibilidad, y aquí se mencionan algunos de los más importantes. Las rocas fosfóricas varían ampliamente en su reactividad y subsecuentemente en su valor agronómico (Lehr y McClellan, 1972). La respuesta agronómica a la roca fosfórica depende casi totalmente del tipo de suelo y en alguna forma del cultivo y del clima. Factores tales como el tiempo, método de aplicación y el tamaño de la partícula pueden afectar también la respuesta. Las rocas fosfóricas a menudo tienen una respuesta más favorable en períodos largos que en períodos cortos, haciendo que su evaluación agronómica y económica sea más difícil.

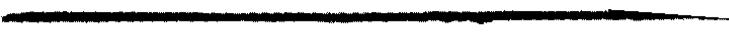
Hay ciertas ventajas de la roca molida para aplicación directa, particularmente para el desarrollo de depósitos de roca de alta reactividad en regiones mediterráneas y/o en la proximidad a importantes áreas agrícolas de apropiados

Cuadro 2. Análisis químico de fosfatos de América Latina seleccionados.\*

Localización, país	Análisis químico (% en peso)														Relación/peso			
	S.C.														(Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )		(Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + MgO)	CaO
	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> <sup>b</sup>	CaO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	Cl	F	S	CO <sub>2</sub>	SiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>		
Capinota, Bolivia	19.9	2.3	23.1	2.6	6.7	0.47	0.24	0.27	0.007	2.0	0.20	5.2	27.4	0.47	0.49	1.41		
Araxá, Brasil <sup>c</sup>	37.0	2.3	48.5	0.5	2.1	0.07	0.24	0.05	N.D.	2.9	0.40	1.2	0.7	0.07	0.07	1.31		
Catalao, Brasil <sup>c</sup>	36.7	1.4	51.2	0.5	2.4	0.07	0.19	0.01	N.D.	2.3	0.72	0.6	0.8	0.08	0.08	1.40		
Jacupiranga, Brasil <sup>c</sup>	37.2	0.7	52.4	0.7	0.3	0.79	0.05	0.47	0.007	1.6	0.03	3.1	1.0	0.03	0.05	1.41		
Patos-de-Minas, Brasil <sup>c</sup>	26.0	2.9	36.2	3.1	2.0	0.43	0.10	0.51	0.002	1.8	4.90	0.8	20.1	0.20	0.21	1.30		
Tapira, Brasil <sup>c</sup>	35.4	0.8	49.1	0.4	2.7	0.77	0.17	0.13	0.034	1.8	0.12	1.3	2.7	0.09	0.11	1.39		
Bahía Inglesa, Chile <sup>c</sup>	27.7	4.3	45.5	2.3	2.6	0.68	1.30	0.33	0.016	3.5	N.D.	2.5	8.4	0.18	0.20	1.64		
Mejillones, Chile <sup>c</sup>	25.6	6.7	41.6	3.6	1.0	0.88	1.60	0.38	0.015	2.8	N.D.	6.1	11.5	0.18	0.20	1.63		
Huila, Colombia	19.4	3.5	39.1	1.7	0.6	0.14	0.19	0.09	0.009	2.7	0.54	9.0	25.1	0.12	0.13	2.02		
Meda Luna, Colombia	30.1	2.3	45.4	0.5	0.4	0.12	0.12	0.07	0.006	3.6	0.30	4.6	12.5	0.03	0.03	1.51		
Pesca, Colombia	19.4	2.4	28.1	1.1	0.9	0.14	0.14	0.15	0.004	2.0	0.06	1.3	44.4	0.10	0.11	1.45		
Sardinata, Colombia	35.4	N.D. <sup>d</sup>	48.6	1.2	0.9	0.05	0.06	0.04	N.D.	3.6	0.09	1.8	6.1	0.06	0.06	1.37		
Napo, Ecuador	25.3	0.8	45.5	0.4	0.8	0.20	0.14	0.11	0.003	3.0	0.39	9.0	11.7	0.07	0.08	1.80		
Baja, México <sup>c</sup>	30.1	3.6	47.8	3.4	0.4	0.18	0.50	0.26	0.004	3.5	0.46	4.7	5.3	0.13	0.13	1.59		
Bayovar, Perú	31.3	5.0	46.1	1.0	0.4	0.39	1.40	0.19	0.038	3.5	1.50	3.5	5.7	0.05	0.06	1.49		
Lobatera, Venezuela	13.8	1.4	39.6	0.9	0.3	0.26	0.10	0.13	N.D.	1.5	0.52	15.9	21.5	0.10	0.11	2.87		
Ricito, Venezuela	27.3	3.1	38.6	1.7	0.8	0.12	0.41	0.06	N.D.	1.3	0.19	3.7	21.4	0.09	0.10	1.41		

\* Analizado por el IFDC.

<sup>b</sup> P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> soluble en citrato medido en citrato neutro de amonio.



1

1

1

Cuadro 2. Análisis químico de fosfatos de América Latina seleccionados.\*

Localización, país	Análisis químico (% en peso)														Relación/peso		
	S.C.		CaO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	Cl	F	S	CO <sub>2</sub>	SiO <sub>2</sub>	(Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ) (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + MgO) CaO			
	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> <sup>b</sup>												P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	
Capinota, Bolivia	19.9	2.3	28.1	2.6	6.7	0.47	0.24	0.27	0.007	2.0	0.20	5.2	27.4	0.47	0.49	1.41	
Araxa, Brasil <sup>c</sup>	37.0	2.3	48.5	0.5	2.1	0.07	0.24	0.05	-	2.9	0.40	1.2	0.7	0.07	0.07	1.31	
Catalao, Brasil <sup>c</sup>	36.7	1.4	51.2	0.5	2.4	0.07	0.19	0.01	-	2.3	0.72	0.6	0.8	0.08	0.08	1.40	
Jacupiranga, Brasil <sup>c</sup>	37.2	0.7	52.4	0.7	0.3	0.79	0.05	0.47	0.007	1.6	0.03	3.1	1.0	0.03	0.05	1.41	
Patos-de-Minas, Brasil <sup>c</sup>	26.0	2.9	36.2	3.1	2.0	0.43	0.10	0.51	0.002	1.8	4.90	0.8	20.1	0.20	0.21	1.39	
Tapira, Brasil <sup>c</sup>	35.4	0.8	49.1	0.4	2.7	0.77	0.17	0.13	0.034	1.8	0.12	1.3	2.7	0.09	0.11	1.39	
Bahia Inglesia, Chile <sup>c</sup>	27.7	4.3	45.5	2.3	2.6	0.68	1.30	0.33	0.016	3.5	-	2.5	8.4	0.18	0.20	1.64	
Mejillones, Chile <sup>c</sup>	25.6	6.7	41.6	3.6	1.0	0.88	1.60	0.38	0.015	2.8	-	6.1	11.3	0.18	0.20	1.63	
Huila, Colombia	19.4	3.5	39.1	1.7	0.6	0.14	0.19	0.09	0.009	2.7	0.54	9.0	25.1	0.12	0.13	2.02	
Media Luna, Colombia	30.1	2.3	45.4	0.5	0.4	0.12	0.12	0.07	0.006	3.6	0.30	4.6	12.5	0.03	0.03	1.51	
Pesca, Colombia	19.4	2.4	28.1	1.1	0.9	0.14	0.14	0.15	0.004	2.0	0.06	1.3	44.4	0.10	0.11	1.45	
Sardinata, Colombia	35.4	0.0	48.6	1.2	0.9	0.05	0.06	0.04	-	3.6	0.09	1.8	6.1	0.06	0.06	1.37	
Napo, Ecuador	25.3	0.8	45.5	0.4	0.8	0.20	0.14	0.11	0.003	3.0	0.39	9.0	11.7	0.07	0.08	1.80	
Baja, Mexico <sup>c</sup>	30.1	3.6	47.8	3.4	0.4	0.18	0.50	0.26	0.004	3.5	0.46	4.7	5.3	0.13	0.13	1.59	
Bayovar, Perú	31.3	5.0	46.1	1.0	0.4	0.39	1.40	0.19	0.038	3.5	1.30	3.5	5.7	0.05	0.06	1.49	
Lobatera, Venezuela	13.8	1.4	39.6	0.9	0.3	0.26	0.10	0.13	-	1.5	0.52	15.9	21.5	0.10	0.11	2.87	
Riecito, Venezuela	27.3	3.1	38.6	1.7	0.8	0.12	0.41	0.06	-	1.3	0.19	3.7	21.4	0.09	0.10	1.41	

\* Analizado por el IFDC.

<sup>b</sup> P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> soluble en citrato medido en citrato neutro de amonio.<sup>c</sup> Concentrado beneficiado.

cultivos y tipos de suelo (suelos ácidos). Bajo estas circunstancias, este enfoque puede ofrecer alternativa a los fosfatos convencionales a causa de los siguientes factores:

1. Costo relativamente bajo.
2. Tecnología relativamente simple y el uso de experiencias locales para la operación.
3. Bajo costo en capital (Peng y Hammond, 1979).
4. Bajo requerimiento de energía -- alrededor de un tercio de la de SFT - (Davis y Blonin, 1976).
5. Uso de rocas no adecuadas para otros tipos de procesamiento.
6. Costos de producción que no son muy sensibles a la economía de escala.
7. La posibilidad de comenzar la construcción de una industria básica de fosfatos en una forma rápida y quizás la más barata, en un país en desarrollo, particularmente donde existen depósitos de fosfatos.

Las principales desventajas de la aplicación directa de roca son estas: La falta de predecibilidad del valor agronómico; la limitación a los suelos ácidos, excepto para fosfatos de aluminio (IFDC, 1979); un contenido relativamente bajo de  $P_2O_5$  comparados con SFT o fosfato de amonio; y la dificultad en el manipuleo, embarque y aplicación debido al estado polvoriento. El problema debido a lo polvoriento puede aliviarse con la granulación.

Los datos disponibles indican que los productos granulares son menos efectivos que la roca finamente molida durante los primeros años de aplicación. Los granos unidos con sales solubles desagregan y se dispersan en el suelo y se aproximan a la efectividad de la roca finamente molida. Sin embargo, algunos pegamentos solubles en agua pueden conducir a la aglomeración irreversible. Además la granulación incrementa el costo de los productos en alrededor de US\$10 a US\$20 por tonelada dependiendo del pegamento y las condiciones locales (Hignett y Livingston, 1982).

A pesar de las ventajas potenciales de la aplicación directa de las rocas y los esfuerzos hechos por el IFDC y otros para promover su uso, ellas cuentan con una fracción relativamente pequeña del total de  $P_2O_5$  consumido en América Latina. Las rocas cuyo uso ha sido reportado para aplicación directa, incluyen la Huila y Pesca en Colombia; y Bayovar en Perú.

### Fosfatos Alterados Termicamente

Los fosfatos alterados termicamente son materiales que suelen ser preparados de una gran variedad de materias primas para hacer frente a las necesidades de fosfatos de los países en desarrollo; ellos representan un nivel de tecnología que parcialmente llena la brecha entre la tecnología de las rocas para aplicación directa y la convencional de los fertilizantes químicos. Algunos factores que pueden incitar al uso de estos tipos de materiales son las propiedades indeseables de los fosfatos indígenas (baja reactividad, bajo grado, composición, etc), las condiciones agronómicas específicas (suelo, clima, cultivo) y las pobres facilidades de transporte.

Los fosfatos hidratados de hierro y aluminio (crandalita, wavelita y milisita) cuando se calcinan alrededor de 500°C, constituyen una clase de fosfatos termales para aplicación directa. La calcinación remueve el agua de hidratación y destruye la cristalinidad de los minerales fosfatados; así, los hace disponibles para las plantas. Este proceso ha sido usado para tratar menas cerca de Thies en Senegal. La piedra recién extraída contiene alrededor del 29% de  $P_2O_5$  en base seca; después de la calcinación ella contiene alrededor del 32% de  $P_2O_5$ . El producto calcinado es molido en un 95% a un tamaño menor que 0.15 mm y vendido bajo el nombre comercial de "Phospal". Los datos de solubilidad y pruebas de campo muestran que este producto tiene buena disponibilidad en suelos ácidos, neutros y alcalinos (Fosfatos de aluminio de Thies en Senegal: Uso de fosfato como fertilizante directo, 1966).

Otra clase de fertilizante fosfático puede ser preparado a partir de rocas de grados premium y no-premium por reacciones promovidas termicamente en el rango de 1000°-1.450°C que destruyen las estructuras de la apatita y permiten la recombinación del  $(PO_4)^{-3}$  en compuestos más reactivos. Varios reactivos inorgánicos pueden ser usados para promover la descomposición de la roca y desarrollar fluor; el producto resultante contiene fosfato insoluble en agua pero soluble en citrato. A pesar de la amplia selección de los reactantes, los productos pueden ser convencionalmente agrupados con base en su forma estructural y su composición (Cuadro 3). La mayoría de estas sustancias fertilizantes tienen un período largo de evaluación y uso en la agricultura, pero su proceso, de uso intensivo de energía y la calidad inferior del producto en comparación con los fertilizantes químicos, han restringido su importancia a una fracción relativamente menor de la producción total de fosfatos. Sin embargo, el factor costo es algo que compensa la desventaja de usar rocas fosfóricas de baja calidad inbeneficiales y reactivos más baratos que los requeridos en el proceso químico húmedo. También, su característica de lenta liberación y su contenido de nutrimentos secundarios y

micronutrientes puede hacer atractivo su completo uso en algunas prácticas agrícolas.

Cuadro 3. Algunos tipos de productos fosfatados termales

Composición teórica	Tipo de material	Reactivos*
$(Ca, Mg)_3(PO_4)_2$	Fosfato tricálcico	(No)
$Ca_4O(PO_4)_2$	Nitronita; vidrios; Hilgenstorcita Escorias básicas	Alcalino terreas
$CaNaPO_4$	Compuesto Rehnania	Alcalis
$CaKPO_4$		
$CaP_2Si_2O_{16}$		
$(Ca, Mg)_7P_2Si_2O_{16}$	Nagelschmidita	Silica
$Ca_3Na_2(P, Si)_4O_{16}$		Mg silicatos
$Ca_5P_2SiO_{12}$	Silicocarnotita	Silica Silicatos
$Ca_{(1/2+1)}(PO_{(3n+1)}) - (n+2)$	Poli-y meta fosfatos	Fosfatos
$Ca_2Cl_1PO_4$	Cloroespodionita	
$Mg_2FPO_4$	Wagenita	Haluros

\* Los componentes accesorios minerales en la roca fosfórica pueden suplir parte o todos los reactivos necesarios.

### Acido Fosfórico

La fabricación de fertilizantes de alto análisis consume ahora alrededor del 90% de la roca fosfórica como materia prima, que con el ácido fosfórico probablemente son los más importantes intermediarios (McClellan y Hignett, 1978). Extensas descripciones del proceso de producción de ácido fosfórico están bien documentadas (Slack, 1968; Becker, 1983), y acá no se hará intento de repetir las. En cambio se discutirán los efectos de algunos factores de la calidad química de la roca fosfórica en el proceso húmedo de producción de ácido fosfórico (AFH), tomando en consideración la composición química de los fosfatos de América Latina.

En la producción de AFH, la relación por peso  $\text{CaO}:\text{P}_2\text{O}_5$  es el factor más importante porque tiene mayor efecto en la economía del proceso (Cuadro 4). Cuando la relación en peso  $\text{CaO}:\text{P}_2\text{O}_5$  es significativamente mayor que 1.6 el ácido sulfúrico requerido puede llegar a ser antieconómico. La relación en peso  $\text{CaO}:\text{P}_2\text{O}_5$  del mineral apatítico fluctúa desde 1.31 hasta 1.61 de manera que una remoción casi total de todo el calcio mineral por beneficiamiento parece ser requerida, pero esto puede no ser técnica ni económicamente factible, particularmente con menas del tipo carbonatado. Para uso obligatorio, los costos adicionales por el reactivo  $\text{H}_2\text{SO}_4$  deben ser sopesados contra los costos del beneficio añadidos, para encontrar el proceso más económico. Estos costos del beneficio pueden ser ineludibles si el concentrado es para competir en mercados abiertos.

Cuadro 4. Efecto de la relación en peso  $\text{CaO}:\text{P}_2\text{O}_5$  en rocas fosfóricas en el consumo de ácido sulfúrico para la producción de ácido fosfórico.

Roca fuente <sup>a</sup>	Relación en peso $\text{CaO}:\text{P}_2\text{O}_5$	Consumo de ácido sulfúrico $\text{t H}_2\text{SO}_4/\text{t P}_2\text{O}_5^b$
Araxa, Brasil	1.31	2.427
Tapira, Brasil	1.39	2.571
Bayovar, Perú	1.49	2.751
Media Luna, Colombia	1.51	2.751
Baja, México	1.59	2.848

<sup>a</sup> Vea el Cuadro 2 para el análisis químico completo.

<sup>b</sup> Cálculo teórico basado en el análisis químico de la roca.

Las impurezas de hierro y aluminio ( $\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{Al}_2\text{O}_3$ ) son particularmente problemáticas en el AFH y sus productos amoniacales. Ellos son responsables principalmente del post-precipitado fangoso en el ácido fosfórico, de la formación de costra en el equipo de concentración del ácido, y de compuestos insolubles en los fosfatos de amonio, etc. (Lehr, 1976). Fosfatos concentrados con contenidos de hierro y aluminio arriba de 2%-3% son poco atractivos para la producción de ácido fosfórico puesto que ellos disminuyen la capacidad de la planta y a veces disminuyen la recuperación de  $\text{P}_2\text{O}_5$ . Una relación  $(\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{Al}_2\text{O}_3) : \text{P}_2\text{O}_5$

aceptada, por la industria estándar, es alrededor de 0.05 o menos (Kouloheris, 1977).

Un incremento en el contenido de magnesio de la roca causa, en el estado de reactor de la producción de ácido fosfórico, que éste se precipite con el aluminio y el hierro y tape los filtros de tela. El magnesio también incrementa la viscosidad del ácido concentrado y aumenta la formación de costra en el equipo de concentración. El magnesio se encuentra principalmente en rocas como carbonatos adicionales (Mg-calcita y dolomita) o como un constituyente de la apatita en si mismo (Lehr y McClellan, 1973). Usualmente las rocas que contienen carbonatos de magnesio en forma mineral son beneficiados para reducir el efecto detrimental del magnesio y también reducir el consumo de ácido sulfúrico.

La relación  $(\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{MgO}) : \text{P}_2\text{O}_5$  deseable en la roca para la producción de AFH es 0.1 o menos (Lawer et al., 1982).

En la producción de AFH los problemas de filtración pueden aumentar por la presencia de cuarzo finamente dividido o gel de silicio como también por una deficiencia de materiales silícicos. Cuando el silicio está presente en cantidades suficientes complica la liberación del fluor durante la acidulación de la apatita (al menos en una relación 4:1 moles), los fluorsilicatos alcalinos son más filtrables y usualmente precipitados. Sin embargo, en ausencia de suficiente silicio, pueden formarse complejos de fluor y fluoruros de aluminio. Estos son usualmente granulados finos y tienen un efecto detrimental en la tasa de filtración. El silicio en la forma gruesa y los granos angulares de cuarzo, actúan como agentes abrasivos que pueden corroer el equipo.

El cloro soluble es más indeseable en la tecnología del ácido fosfórico por su acción corrosiva en el equipo y el problema del humo, que por su interferencia química en el proceso de manufactura. La fuente usual de cloro en rocas sedimentarias son las sales evaporíticas o los residuos de las aguas de mar que pueden ser usadas en los pasos del beneficio. Ambas fuentes pueden ser minimizadas lavando el material con agua limpia. En las rocas ígneas, el cloro está usualmente presente en la apatita como un sustituto del fluor y puede requerir tratamiento térmico para reducir su concentración (Gremillion et al., 1976). En general, contenidos de cloro más altos que 500 ppm no pueden ser tolerados porque la corrosión viene a ser excesiva para el acero común.

La presencia de carbón orgánico en las rocas fosfóricas causa problemas debido a la formación de espuma en la producción de AFH y porque reduce efectivamente el volumen

del reactor e incrementa los costos de control de los reactivos.

El carbón orgánico contribuye a la decoloración del AFH y así hace el producto estéticamente menos deseable para el consumidor. El carbón orgánico también puede agravar la corrosión por cloro al crear un ambiente reducido durante la acidulación (Rule et al., 1978). El tratamiento térmico a 400°-500°C puede remover el carbón orgánico. Niveles por debajo de 1% de carbón orgánico son considerados aceptables.

La anterior discusión sugiere que, además del contenido de  $P_2O_5$  de la roca, otros factores químicos juegan papeles importantes en la evaluación para la producción de ácido fosfórico. El efecto detrimental de ciertos constituyentes químicos en el proceso del ácido fosfórico afecta el valor relativo de mercadeo de la roca fosfórica que de otra manera podría parecer competitivo sobre la base solamente de su grado en  $P_2O_5$ . En la industria de fosfatos no hay estándares sobre los factores químicos debido a que no hay un proceso ni un producto final específico. Sin embargo, la industria se está esforzando por producir fosfatos concentrados con un contenido tan bajo de impurezas como es posible. Esto está resultando en más baja recuperación de  $P_2O_5$  en el beneficio y más alto costo.

En la tecnología nueva o convencional el uso de rocas no beneficiadas, o con el mínimo de beneficio, en la producción de AFH es evaluada por el IFDC y otros. Una planta como esta puede diseñarse para procesar localmente materiales que pueden no reunir un grado químico convencional o especificaciones de calidad. La decisión económica que favorece semejante planta está basada en la ventaja o desventaja del mayor manipuleo de materia prima si el grado es bajo, aumento en el consumo de ácido si la relación fosfato a óxido de calcio es alta, más altos costos de la molienda si la piedra es dura y más baja eficiencia en la planta si el procesamiento es afectado por arcillas y/o materia orgánica. El mérito relativo de un material en particular puede ser determinado por comparar los parámetros de varios procesos con un estándar seleccionado (Tanke y Clayton, 1984). Esta aproximación permite la selección de materiales con el mejor valor y el mérito, si lo hubiera, de incurrir en costos adicionales para mejorarla comparado con el costo de procesar menas no beneficiadas.

En el caso de las menas silíceas, el uso de rocas de bajo grado aumenta la cantidad de materia inerte transportada a través del sistema. Esto aumenta los requerimientos para moler la roca, la capacidad de filtración y los sólidos desechables. El silicio también puede aumentar los problemas de erosión con agitadores y bombas. La disminución en el capital de beneficio y costos de operación y una reducción significativa de las pérdidas de fosfatos

durante la fabricación, son los mayores beneficios para procesar menas silíceas sin tratamiento. El IFDC ha demostrado exitosamente la producción de ácido fosfórico a partir de la roca colombiana Pesca no beneficiada. Sin embargo, la cantidad de producción de sólidos secos fue alrededor del 140% del obtenido con el concentrado Florida central.

### Super Fosfato Simple

Debido a que el proceso de SFS tiene regularmente una tolerancia amplia por la composición de las rocas, este proceso puede ser solamente de uso práctico para algunas rocas nativas de América Latina de mercados locales o regionales donde las especificaciones del grado son menos importantes que el costo y la disponibilidad. El SFS tiene una lista impresionante de ventajas. Por ejemplo, él requiere un proceso simple que demanda pocas habilidades técnicas, o un pequeño capital de inversión, y tiene excelentes características fertilizantes que han sido estandarizadas por muchos años. (Este producto también suple cantidades secundarias de calcio y azufre). La principal desventaja es el bajo grado (16%-22% de  $P_2O_5$ ), lo cual resulta en un más alto costo por unidad distribuida cuando se compara con los fertilizantes más concentrados.

Las plantas de SFS son justificadas en localidades donde: (1) tanto el azufre como el fosfato son deficientes, (2) la importación es escasa y cara, (3) el ácido sulfúrico está disponible como subproducto y (4) los depósitos de fosfatos o el mercado son pequeños. Estas condiciones parecen ocurrir a menudo en varios países en desarrollo que necesitan la explotación de sus fuentes de rocas nativas.

Debido a que el contenido de fosfato del SFS varía con el grado de la roca, los factores que disminuyen el grado, tales como el contenido de silicio y la relación fosfato-calcio, reducen el contenido de nutrimento del producto. Los contenidos de hierro y aluminio pueden solamente ser tolerados dentro de ciertos límites. Un estudio de los efectos de varios factores en la producción de SFS a partir de 15 rocas muestran que la disminución en fosfato soluble en agua y el incremento del fosfato soluble en citrato fue directamente relacionado con los contenidos de hierro y aluminio de los depósitos estudiados. Estos datos también muestran que el SFS hecho de rocas ígneas que contienen cantidades relativamente altas de hierro y aluminio muestran menos del 70% de conversión a fosfatos solubles en agua después de cuatro semanas de almacenamiento, mientras que las menas de rocas sedimentarias de baja reactividad promedian alrededor del 75%-80% de conversión y el de fuentes reactivas promedian alrededor del 90% de conversión.

En algunos concentrados apatitos de rocas ígneas, el hierro tiene un efecto deletéreo muy significativo en el procesamiento de superfosfato. Por ejemplo, experiencias industriales con un concentrado ígneo de América Latina muestran que un aumento en el contenido de hierro causa una disminución sistemática en la disponibilidad de fosfato (Sinden, 1982).

La disminución en la disponibilidad resulta de la reversión del fosfato disponible a una forma no disponible durante el "curado". El IFDC ha identificado y probado un aditivo que puede reducir la reversión en algunos materiales. Los concentrados ígneos parecen ser más sensibles a las reacciones de reversión que los sedimentarios que contienen el mismo nivel de impurezas. El SFS hecho de un concentrado de Florida (sedimentario) que contiene alrededor del 2% de hierro, muestra alrededor del 92% de conversión a fosfato disponible después de cuatro semanas de "curado", mientras que el producto hecho de dos concentrados ígneos procesados al mismo tiempo, muestra solamente 82% de conversión.

La granulación del SFS a menudo depende de la preferencia local. En muchos casos el SFS no granular es aceptable. Varios minerales o compuestos químicos pueden adicionarse para suplir nutrimentos secundarios o micronutrimentos, en una forma u otra. La granulación puede ser llevada a cabo después de la extracción o después del "curado" -- son las prácticas más populares en la mayoría de las plantas comerciales. En algunos casos, el SFS es usado para producir fertilizantes compuestos granulados o mezclas a granel. Lo económico a menudo limita la producción de SFS a plantas que sirven al mercado local donde la materia prima adecuada está disponible y la importación de materiales más concentrados u otros materiales alternativos es más cara. Circunstancias agronómicas especiales que requieran azufre como nutrimento, pueden hacer del SFS una alternativa de más valor que aquellas que no contienen azufre.

### Superfosfato Doble

El fosfato "enriquecido" o superfosfato doble (SFD) puede ser hecho por la acidulación de roca fosfórica con una mezcla de los ácidos fosfórico y sulfúrico. El proceso y el equipo son similares a los usados con SFS, pero los grados son más altos y fluctúan entre 25% y 35% de  $P_2O_5$ . Algunas ventajas del superfosfato doble sobre el SFT son la inclusión del sulfato como un nutrimento y en algunos casos, el uso de ácido fosfórico diluido en la mezcla (Figura 1). Lo último es posible porque la concentración conveniente resulta cuando el ácido fosfórico diluido se mezcla con ácido sulfúrico 93%-98%.

El calor de dilución es suficiente para evitar la concentración del ácido fosfórico diluido en un paso

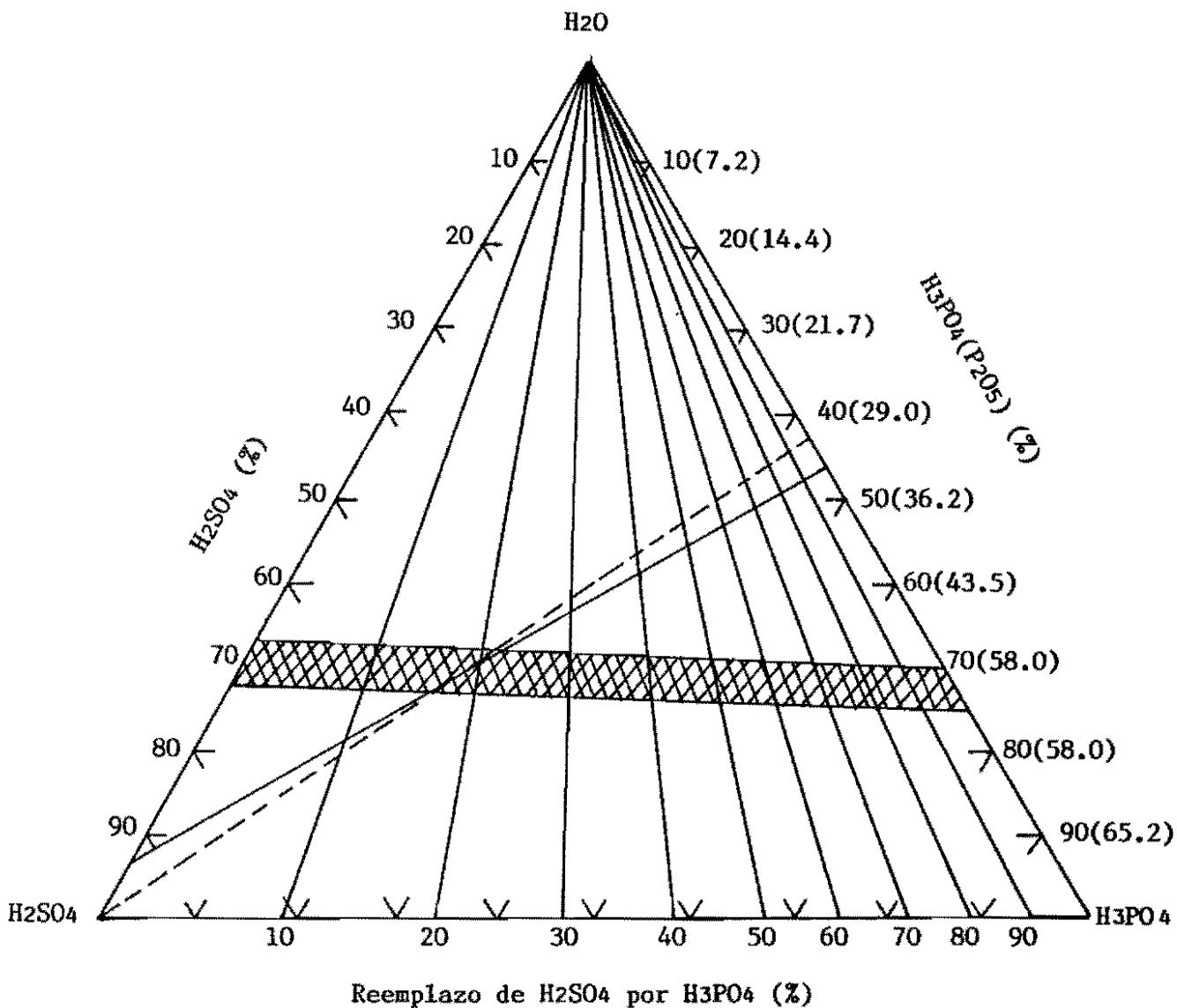


Figura 1. Composición y valor de acidulación de mezclas acuosas de los ácidos sulfúrico y fosfórico (Obtenidos de Superfosfato: Su Historia, Química y Manufactura).

separado. Los fosfatos enriquecidos pueden ser importantes en el uso de los recursos nativos porque su alto grado ayuda a disminuir los costos del transporte. El uso de ácidos mezclados permite cierta flexibilidad en el grado del producto, preserva una porción del valor agronómico del contenido de sulfato, y reduce el requerimiento de ácido fosfórico. Un producto con las mismas propiedades puede ser hecho por la mezcla de SFS y SFT en varias proporciones. El IFDC ha demostrado exitosamente la producción de SFD a partir de roca Pesca. El contenido de  $P_2O_5$  del producto fluctúa entre 29% y 39%, mientras que la disponibilidad promedia alrededor del 95%.

### Superfosfato triple

El superfosfato triple es el más alto grado de fertilizante convencional que puede ser producido directamente de roca fosfórica de costo relativamente bajo. El porcentaje de fosfato en el producto derivado de la porción de roca molida de la mezcla varía desde 25% a 40% dependiendo del grado de la roca, la relación fosfato a óxido de calcio, y el contenido de impurezas del ácido y de la roca. En general, el SFT producido de rocas de bajo grado derivan la más pequeña porción de su fosfato de la roca de la mezcla. El SFT contendrá las impurezas químicas (incluidos óxidos de metales) que se derivan de la roca fosfórica así como aquellas que ocurren en el ácido fosfórico. En muchas plantas de ácido fosfórico, el "ácido fangoso" derivado de los pasos de clarificación del proceso ha llegado a ser el mayor componente en algunos SFT, y verdaderamente los fosfatos metálicos han sido reemplazados por el fosfato monocálcico como el principal componente en ciertos productos (Frazier y Lehr, 1967). Así, rocas fosfóricas o ácido fosfórico de baja calidad, o ambos pueden ser la fuente de las mismas impurezas y rendimiento similar de productos finales. La cantidad de impurezas que puede ser tolerada depende del criterio usado para establecer el valor comercial de los productos. Donde el criterio es un alto nivel de solubilidad en agua, tanto la roca como el ácido deben tener bajos contenidos de hierro y aluminio. Si el criterio es la solubilidad en citrato o el fosfato disponible, entonces altos niveles de impurezas pueden ser aceptables con algunos ajustes en el procesamiento.

En el proceso de superfosfatos, las propiedades físicas de reacción de la mezcla (fluidez, plasticidad y estados sólidos) son importantes en el manipuleo del material durante el procesamiento. Así la reactividad de la roca es un factor significativo que afecta el procesamiento de algunas menas. Rocas no reactivas pueden requerir molienda fina y/o un proceso más largo para lograr un producto final apropiado. Algunas apatitas ígneas con poca área superficial pueden requerir pasos extras en el procesamiento

con los cuales aún pueden no rendir alta conversión de los fosfatos a formas solubles en agua o citrato.

En una prueba de SFT comparando una apatita y un fosfato sedimentario concentrado en el cual alrededor del 85% de las partículas eran más pequeñas que 0.075 mm, el porcentaje de reacción que ocurre en la fosa era solamente 44% para la apatita ígnea comparado con 99% de la roca sedimentaria. Cuando el tamaño de la partícula de la apatita ígnea fue reducido a que el 95% pasara 325 mallas (0.045 mm), su reactividad fue aún solamente 60% de lo correspondiente a la piedra sedimentaria.

Después de cuatro semanas de "curado", el SFT hecho de la apatita ígnea mostró menos conversión a formas disponibles que el material sedimentario (la diferencia de 90% versus 96%). Aumento en la temperatura de acidulación puede incrementar la conversión y disminuir la humedad en el arrume final del producto. Esto puede ser acompañado con la adición de pequeñas cantidades de ácido sulfúrico concentrado a el ácido fosfórico para obtener la temperatura deseada. En general la experiencia del IFDC ha mostrado que el SFT hecho de apatitas ígneas, requiere dos a cuatro veces más tiempo de decantación que el derivado de materiales sedimentarios de grado y tamaño de partículas comparables (incrementos similares de tiempo de retención también pueden ser necesarios en el reactor que origina la colada que produce SFT).

Los efectos perjudiciales del hierro y el aluminio son más pronunciados para la producción de SFT que para la producción de SFS. Además de causar problemas de reversión, los niveles altos de hierro y aluminio hacen al producto pegajoso y difícil de manejar. No se han establecido niveles en los contenidos de hierro y aluminio, aunque algunos, (Dee et al., 1957) han sugerido que la combinación de los óxidos de hierro y aluminio no deben exceder a 5.0% para una buena solubilidad en agua y 7.5% para una buena solubilidad en agua más citrato. Como se indicó al principio, la relación de impurezas a  $F_2O_3$  puede ser un criterio más significativo que los valores absolutos. Porcentajes de impurezas por peso aceptables decrecen linealmente con el grado de la roca.

El nivel de hierro insoluble en agua y los productos de reacción de aluminio y fosfato en el SFT que son aceptables con respecto a su comportamiento agronómico no se han establecido. En áreas con alta precipitación, estos fosfatos insolubles en agua pueden ser ventajosos, pero esto falta ser demostrado. Quizás es necesario más trabajo para definir la proporción de fosfato soluble en agua a fosfato soluble en citrato que puede ser aceptable bajo ciertas condiciones agronómicas. Tales resultados podrían ser

importantes para estimar la efectividad de un número de fertilizantes.

### Roca Fosfórica Parcialmente Acidulada

Las rocas fosfóricas parcialmente aciduladas (RFFA) se refieren a un producto sub-acidulado que ha sido tratado solamente con una porción del ácido (usualmente sulfúrico o fosfórico) requerido para convertir el fosfato de calcio de la roca a fosfato monocálcico monohidratado, una sal soluble en agua. La proporción de ácido añadida se expresa como un porcentaje de la cantidad estequiométrica de ácido requerida para acidular totalmente esa roca en particular. Así, si una roca en particular totalmente acidulada requiere 604 kg de ácido sulfúrico 100% por tonelada de roca, un producto acidulado 50% usaría 302 kg de ácido sulfúrico 100% por tonelada de roca. Debido a que los productos de RFFA contienen una mezcla de fosfato monocálcico monohidratado y fosfato dicálcico, la cantidad de  $P_2O_5$  disponible ( $P_2O_5$  soluble en agua más soluble en citrato) producido por unidad de ácido sulfúrico puede ser más alta que un producto acidulado totalmente. Los productos del tipo RFFA han sido evaluados agronómicamente en varios países de América Latina. Los resultados de estos experimentos son tratados en otro documento.

Hay varias ventajas de las RFFA. Un ahorro significativo en azufre puede resultar de las RFFA. Por ejemplo, un producto de RFFA 50% que es 80% tan efectiva agronómicamente como el SFS representa un ahorro de 40% en el consumo de ácido sulfúrico por unidad de producto.

Otra ventaja es la tolerancia en el proceso por la baja calidad de rocas no reactivas. Un ejemplo específico es el de la roca de Bolivia (Capinota) cuyo alto contenido de Fe y Al la excluyen para la producción de superfosfatos. Sin embargo, productos de RFFA satisfactorios pueden ser preparados con esta roca usando ácido sulfúrico. Algunos resultados (Cuadro 5) de este estudio muestran un incremento general en el  $P_2O_5$  disponible con el incremento en los niveles de acidulación. Una comparación de los datos del  $P_2O_5$  soluble en agua y disponible muestran que el  $P_2O_5$  soluble en citrato es un componente importante en muestras almacenadas por más de un día. La disminución en el fosfato soluble en agua resulta sin embargo de la reacción con los óxidos e hidróxidos de hierro y aluminio que ocurren en el material. Los productos de reacción del hierro y el aluminio pueden ser total o parcialmente insolubles en citrato.

Varios fosfatos de América Latina han sido usados para producir RFFA granular por un proceso desarrollado por el IFDC (Cuadro 5). Este proceso permite la simultánea acidulación y granulación de las rocas fosfóricas usando la

Cuadro 5. Productos de roca fosfórica parcialmente acidulada preparados para evaluación agronómica.\*

Roca fuente	Acidulaciones intentadas <sup>b</sup> (%)	Análisis químico (% por peso)		
		P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> Total	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> Soluble en agua	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> Disponible <sup>c</sup>
<u>Acido sulfúrico base</u>				
Capinota, Bolivia				
de 1 día	25	17.0	2.4	4.7
de 1 mes	25	17.1	2.0	4.6
de 1 día	50	15.6	4.0	7.0
de 1 mes	50	15.5	3.2	7.4
de 3 meses	50	15.5	2.8	7.6
Huila, Colombia				
de 1 día	50	16.9	9.4	10.9
de 1 mes	50	17.3	9.0	10.6
de 3 meses	50	17.1	8.8	10.5
Pesca, Colombia				
de 1 día	20	17.4	3.8	6.9
de 1 mes	20	17.6	3.4	7.1
de 1 mes	40	16.4	6.3	10.7
de 1 mes	40	16.7	6.2	10.7
Napo, Ecuador				
de 1 día	25	21.0	5.3	6.9
de 1 mes	25	20.5	5.3	6.9
de 1 día	50	19.7	7.2	8.6
de 1 mes	50	19.3	7.7	8.7
Bayovar, Perú				
de 1 día	25	26.3	4.9	11.5
de 1 mes	25	26.2	4.8	11.6
de 1 día	50	22.2	9.9	13.8
de 1 mes	50	22.3	10.0	14.8
de 3 meses	50	22.3	9.9	15.0

(Continúa)

Cuadro 5. Productos de roca fosfórica parcialmente acidulada preparados para evaluación agronómica.\* (Continuación).

Roca fuente	Acidulaciones intentadas <sup>b</sup> (%)	Análisis químico (% por peso)		
		P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> Total	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> Soluble en agua	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> Disponible <sup>c</sup>
<u>Acido fosfórico base</u>				
Pesca, Colombia				
de 1 día	10	23.1	4.7	8.6
de 1 mes	10	23.3	4.9	8.8
Pesca, Colombia <sup>d</sup>				
de 1 día	20	24.1	8.2	11.2
de 1 mes	20	24.2	8.3	11.3
de 1 día	30	25.1	8.8	12.7
de 1 mes	30	25.3	9.4	12.9
de 1 día	40	29.4	17.8	21.7
de 1 mes	40	29.3	17.7	21.5

\* Productos en forma granular, 1.3 mm.

<sup>b</sup> Acido sulfúrico - porcentaje de ácido requerido para producir SFS.

<sup>c</sup> Suma de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> soluble en agua y citrato. P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> soluble en citrato, medido en solución citrato neutro de amonio.

<sup>d</sup> Preparado del concentrado. Análisis: P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>--22.2%; CaO--30.7%; Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>--2.2%; Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>--1.4%; MgO--0.13%; Na<sub>2</sub>O--0.12%; K<sub>2</sub>O--0.25%; F--2.2%; S--0.06%; CO<sub>2</sub>--1.4%; SiO<sub>2</sub>--36.6%.

configuración y el equipo de granulación típica comercial. Se ha encontrado que las RFFA granulares (1-3 mm) hechas por este proceso, contienen relativamente más alta proporción de  $F_2O_6$  soluble en agua y disponible, que los productos no granulares. Esto puede ser debido a mejor mezcla del ácido y la roca antes de la granulación y la mínima reacción del hierro y el aluminio para formar compuestos insolubles en citrato. El secamiento del producto inmediatamente después de la acidulación-granulación disminuye el volumen de la fase líquida reactiva presente en el gránulo y disminuye el potencial de reacción de las fases hierro y aluminio.

Los productos RFFA podrían ser menos caros de producir que los superfosfatos totalmente acidulados porque se requiere menos ácido. Por ejemplo, alrededor de 1.7 toneladas de ácido sulfúrico se requiere para producir 1 tonelada de fosfato como SFS. Esta cantidad de ácido a menudo representa el 15% al 30% del costo total de producción del SFS. Por lo tanto, se debe prestar atención a la producción de productos aceptables agrónomicamente que puedan ser hechos con un ahorro significativo en el consumo de ácido.

La idea de sub-acidular productos parece que puede llegar a ser más atractiva. Actualmente hay varios productores europeos, y ha habido un gran aumento en los productores y en el tonelaje en países en desarrollo en el Medio Oriente y en América Latina. Los últimos productores utilizan procesos que han sido desarrollados específicamente para operar bajo condiciones de las características únicas de los materiales nativos que son tratados.

### Fertilizantes Compuestos

Es el término usado para describir todos los fertilizantes que contienen más que uno de los tres nutrientes primarios (N, P, K). Varios grados son formulados para suplir diferentes proporciones de los nutrientes que son requeridos por varios cultivos y suelos. Los fertilizantes compuestos pueden también contener uno o más elementos secundarios y micronutrientes cuando se ha establecido su necesidad agrónomica.

La mayoría de las factorías de producción existentes en América Latina producen solamente materiales de nutrientes simples, tales como SFS, SFT, o materiales de doble nutriente como MAP y DAP. Aunque muy usados, los materiales "crudos" usualmente no suplen todos los nutrientes necesarios para alcanzar los máximos rendimientos.

Los fertilizantes compuestos pueden prepararse por mezclas simples de materiales secos (mezcla a granel) o por métodos complejos, granulación húmeda o química (McClellan y Schultz, 1985). En cualquiera de los casos el asegurar buen

almacenamiento, manipuleo y adecuada aplicación, es esencial para que el producto terminado (compuesto o "crudo") esté en la forma de gránulos fuertes y de libre fluidez.

Algunos productos hechos con recursos indígenas que deben ser usados en fertilizantes compuestos son superfosfatos amoniacales, nitrofosfatos, y fertilizantes NPK basados en rocas fosfóricas.

### **Superfosfato Amoniacal**

Los fosfatos no granulares pueden ser amonificados usando varias soluciones nitrogenadas (amonio, nitrato de amonio y urea). La amonificación del superfosfato disminuye su solubilidad en agua, pero esto puede no ser importante si el  $P_2O_5$  disponible es usado como el criterio para el mercadeo del producto en áreas locales o regionales. El SFT amoniacal y el SFS amoniacal pueden tener respectivamente sólo el 50% y el 20% de su  $P_2O_5$  disponible en la forma soluble en agua. La sobreacidulación de los productos puede ser usada para lograr una más rápida conversión y mejor capacidad de amonificación. El superfosfato amoniacado contiene dos nutrimentos primarios, y también tiene buenas propiedades físicas y mejor compatibilidad en mezclas con otros materiales fertilizantes, particularmente urea.

Productos parcialmente acidulados que contienen fosfato dicálcico u otra fase soluble en citrato también son buenos para mezclas. Sin embargo, estas sales usualmente contienen pocos iones hidrógenos acidificantes en sus fórmulas y así tienen más baja capacidad de amonificación. Las cantidades y tipos de impurezas que a menudo ocurren en materiales fosfatados nativos indican que los productos parcialmente acidulados son una buena alternativa técnica y económica. La amonificación de la mayor parte de los productos solubles en citrato no está garantizada por la razón expuesta arriba.

### **Nitrofosfatos**

El proceso de los nitrofosfatos usando rocas indígenas de países en desarrollo, ha sido en parte limitado aunque algunas plantas se han establecido en varios países - Turquía, Pakistán, China, India y Colombia, para nombrar unos pocos. La tendencia histórica ha sido un incremento en el proceso de acidulación en ácido cuando el precio del azufre sube a ciertos niveles. La principal ventaja de este proceso es el doble propósito servido por el ácido nítrico - solubilizar la roca fosfórica y proveer fertilizante nitrogenado. Además, algunos de los procesos para producir nitrofosfatos pueden tolerar niveles relativamente altos de hierro y aluminio en las rocas.

El proceso más simple es análogo a la producción de SFS en el cual el fosfato y el ácido nítrico son convertidos a

fosfatos monocálcico monohidratado y nitrato de calcio. Un producto típico puede contener 8% de nitrógeno y 16% de fosfato. El bajo análisis y el carácter higroscópico son serias desventajas de estos productos.

La mayoría de los procesos de producción de nitrofosfato incluyen la disolución de la apatita en la roca para formar ácido fosfórico y nitrato de calcio. El calcio usualmente es removido por precipitación o intercambio iónico de la mezcla de reacción, antes de la amonificación. El grado de calcio removido determina el grado del producto, y como una extensión, su solubilidad ( $P_2O_5$  soluble en agua y citrato). El método de producción de nitrofosfato ha sido usado para procesar menas indígenas en países en desarrollo en Asia y en América Latina.

### **Rocas Fosfóricas como Bases de Fertilizantes Nitrógeno Fósforo y Potasio (NPK)**

La factibilidad de usar recursos de fosfatos indígenas sin hacer caso de la calidad, puede a menudo ser realizada si el fosfato es incorporado a la estrategia para suplir todo el fertilizante de un cultivo o región en particular. Tal estrategia usualmente incluye el uso de los tres nutrimentos primarios -- nitrógeno, fósforo y potasio -- así como también un número de secundarios y micronutrimentos.

La mezcla o combinación de fosfatos (rocas molidas, rocas aciduladas o ácido fosfórico) con otras fuentes de nutrimentos, tales como urea, sulfato de amonio, potasa y kieserita, no siempre es factible. En algunos casos, reacciones químicas entre los ingredientes requieren ciertas precauciones con respecto a la mezcla, procesamiento y almacenamiento del producto.

La urea se espera que permanecerá como la fuente más disponible de nitrógeno en el mundo en desarrollo. Por lo tanto, hay una continua necesidad de identificar materiales fosfatados que sean compatibles con urea y otros ingredientes en los fertilizantes compuestos. Esta necesidad es además amplificada por la expansión del sector agrícola en el mundo en desarrollo, una mano de obra rural a menudo contraída, alto costo energético, y unas inadecuadas facilidades de transporte e infraestructura.

Un producto cogranulado que contenga  $P_2O_5$  de roca fosfórica y nitrógeno de urea es potencialmente un fertilizante NP económico para países de América Latina. La relación N:  $P_2O_5$  en el producto puede ser variada dependiendo de las necesidades agronómicas, reactividad de las rocas y las características del suelo (Chien, 1979). El IFDC ha demostrado la producción de semejante producto usando tres fuentes de roca con reactividad variada, sin aparente

diferencia en la calidad del producto y las condiciones de procesamiento (IFDC, 1982).

El uso de materiales tipo-superfosfato con urea ha sido sugerido como una alternativa posible. Sin embargo, tal mezcla tiende a reaccionar y formar un derivado. Esta reacción está acompañada por la liberación de agua, lo cual en ciertos casos es muy molesto porque la tasa de liberación es enteramente impredecible. En algunos casos, dependiendo sobre todo de las características del superfosfato, puede ocurrir rápidamente - durante el proceso de granulación, por ejemplo - y conduce a la sobregranulación, pegajocidad, atrancamiento y el transtorno general del proceso. En otros casos, la liberación de agua puede ocurrir lentamente y se manifiesta varias semanas o meses después en forma de deterioro del producto por apelmazamiento.

Para evitar esto varias técnicas han sido propuestas, incluyendo el secamiento o amonificación del superfosfato; el costo adicional y la carencia de confiabilidad de estas técnicas son citadas como las principales razones para su limitada adopción. Otros ingredientes diferentes al superfosfato (cloruro de potasio y algunas sales de magnesio, por ejemplo) en algunos compuestos que contienen urea también afectan adversamente el procesamiento y las características de almacenamiento de los productos, aunque las razones de este fenómeno no son siempre claramente comprensibles. Las mezclas de urea y superfosfato son evitadas usualmente, especialmente si se prevee un almacenamiento largo. El superfosfato ha sido en su mayor parte reemplazado por fosfatos de amonio, particularmente DAP porque es una fuente de fosfato más compatible con urea. Como con el superfosfato, las características de la roca fosfórica usada para producir el ácido fosfórico y el fosfato de amonio pueden aun influir la factibilidad de mezclar el fosfato de amonio con urea.

El potencial agronómico de algunos suelos de América Latina es limitado por deficiencias tanto de azufre como de fosfato (Kanwar and Mudahar, 1984). Sin embargo, la producción de estos fertilizantes requiere el uso de ácido sulfúrico, el cual no siempre está disponible. Un producto con buen potencial es una mezcla de roca fosfórica y azufre elemental.

Tradicionalmente, tal producto ha sido difícil de producir por el peligro de explosión y fuego (Hignett, 1979), pero investigación corriente del IFDC procura aliviar estos problemas a través de las materias primas y modificación de los procesos.

## Conclusiones

La producción de fertilizantes fosfatados en países de América Latina, como un grupo, ha retrasado su uso. Como resultado, estos países son importadores de fertilizantes fosfatados. Esta situación, combinada con el rápido incremento de las necesidades y la presencia de más materia prima de la requerida, provee la oportunidad para los países de América Latina de expandir las industrias productoras de fertilizantes fosfatados y de este modo ayudar a mejorar su economía. Las rocas fosfóricas de América Latina varían en el contenido de  $P_2O_5$ , reactividad, y calidad y requieren diferentes técnicas de procesamiento.

Cada técnica, sin embargo, tiene ciertas ventajas y desventajas con respecto a los requerimientos agronómicos y al proceso económico. Durante los pasados 10 años, el IFDC ha logrado considerable experiencia en el desarrollo de procedimientos necesarios para hacer decisiones sobre un número de minas de fosfatos del sub-Sahara en el Africa. En algunos casos los procesos son modificados para acomodarse a las peculiaridades de una mina específica. Por otro lado, las especificaciones de los productos son ajustadas para permitir el uso de recursos locales. En todos los casos, sin embargo, el último objetivo es proveer fertilizante de más bajo costo a los agricultores.

## REFERENCIAS

- Aluminum Phosphate at Thies in Senegal: Use of Phosphal as a Straight Fertilizer. 1966. Phosphorus and Potassium, 26:17.
- Becker, P. 1983. Phosphate and Phosphoric Acid. Marcel Dekker, Incl., New York, New York.
- Chien, S.H. 1979. "Dissolution of Phosphate Rock in Acid Soils as Influenced by Nitrogen and Potassium Fertilizers", Soil Sci., 127(6):371-376.
- Davis, C.H. and G.H. Blouin. 1976. "Energy Consumption in the U.S. Chemical Fertilizer System from the Ground to the Ground", Conference on Energy and Agriculture, Center for the Biology of Natural Systems, Washington University, St. Louis, Missouri.
- Frazier, A.W. and J.R. Lehr. 1967. "Iron and Aluminum Compounds in Commercial Superphosphates", J. Agr. Food Chemistry, 15(2):348.
- Gremillion, L.R.; G.H. McClellan and J.R. Lehr. 1976. "Chloride Contents of Phosphate Rocks", Abstract, American Chemical Society Meeting, Los Angeles, California.
- Hignett, T.P. 1979. "Technology of Production of Fertilizers Containing Ca, Mg, and S", Paper presented at the Colombian Soil Science Colloquium on Saline Soils and Secondary Elements in Colombian Agriculture, September 19-21, Palmira, Colombia.
- Hignett, T.P. and D.W. Livingston. 1982. "Development of Technology Applicable to Small Fertilizer Plants: IFDC and TVA Studies", Paper presented at the UNIDO Seminar on Mini-Fertilizer Plants, Lahore, Pakistan.
- Hill, W.L. and W. A. Jackson. 1964. "Concentrated Superphosphate: Manufacture", In: Superphosphate: Its History, Chemistry, and Manufacture, pp. 196-216, U.S. Government Printing Office, Washington, D.C.
- International Fertilizer Development Center. 1979. Fertilizer Manual, IFDC-R-1, Muscle Shoals, Alabama 35662, U.S.A. (also available from the United Nations Industrial Development Organization, Vienna, Austria).
- International Fertilizer Development Center. 1982. Annual Report 1980, Circular IFDC -S-4, Muscle Shoals, Alabama
- Kanwar, J.S. and M.S. Mudahar. 1984. Fertilizer Sulfur and Food Production: Research and Policy Implications for

Tropical Countries Executive Brief, Muscle Shoals, Alabama.

- Kouloheris, A.P. 1977. "Solving Problems in Chemical Processing of Low Quality Rock", Eng. Mining J., 8(9):104.
- Lawver, J.E.; R.E. Snow; R.L. Wiegel and C.L. Hwang. 1982. "Phosphate Reserve Enhancement by Beneficiation". Mining Congress J., 68(12):27-31.
- Lehr, J.R. 1976. "Phosphate Raw Materials and Fertilizers: A Look Ahead", Presented at TVA-ASA-SSSA-CSSA Symposium on the Role of Phosphorus in Agriculture, June 1-6, Muscle Shoals, Alabama.
- Lehr, J.R. and G.H. McClellan. 1972. "A Revised Reactivity Scale for Evaluating Phosphate Rocks for Direct Application", Bulletin Y-43, Tennessee Valley Authority, Muscle Shoals, Alabama.
- Lehr, J.R. and G.H. McClellan. 1973. "Phosphate Rocks: Important Factors in Their Economic and Technical Evaluation", In: CENTO Symposium on the Mining and Beneficiation of Fertilizer Minerals, pp. 194-242, Ankara, Turkey.
- McClellan, G.H. and T.P. Hignett. 1978. "Some Economic and Technical Factors Affecting Use of Phosphate Raw Materials", In: Phosphorus in the Environment: Its Chemistry and Biochemistry, Ciba Foundation Symposium 57:49-73.
- McClellan, G.H. and J.J. Schultz. 1985. "Phosphate Products from Indigenous Resources", Paper presented at British Sulphur Corporation's Eighth International Conference, February 10-13, London, England.
- Peng, F.H. and L.L. Hammond. 1979. "Ground and Granulated Phosphate Rocks for Direct Application", In: Proc. of the Seventeenth Technical Conference of the New Zealand Fertilizer Manufacturers' Research Association, Volume 2, pp. 157-186.
- Rule, A.R.; D.E. Kirby and D.C. Dohlin. 1978. "Recent Advances in Beneficiation of Western Phosphates", Mining Eng., 30:37-40.
- Slack, A.V. (ed.). 1968. Phosphoric Acid, Marcel Dekker, Inc., New York, New York.
- Tanke, M.A. and W.R. Clayton. 1984. "COST and BALANCE Calculations for the Dihydrate Phosphoric Acid Process", Paper presented at the 188th American

Chemical Society National Meeting, Philadelphia,  
Pennsylvania.

Sinden, J. 1982. MANHA S.A., Brazil. Personal  
communication.

### 3. REACCIONES DEL FOSFORO EN SUELOS TROPICALES

Sen H. Chien<sup>a</sup>  
Luis A. León<sup>b</sup>  
Lawrence L. Hammond<sup>a</sup>

#### RESUMEN

La reacción de los fertilizantes fosfatados con los suelos es un sistema complejo en el cual las tasas de reacción y las formas de los productos de reacción formados dependen de los tipos de fertilizantes fosfatados que se hayan usado y de la composición química y mineralógica de los suelos en los cuales se aplicaron dichos fertilizantes.

El propósito de este trabajo es el de revisar alguna información sobre (1) la química de las reacciones del fósforo (P) con los minerales del suelo en los suelos tropicales de Latinoamérica y (2) los factores que influyen en las reacciones de varios fertilizantes fosfatados en los suelos.

#### Introducción

La deficiencia de fósforo en los suelos de América Latina Tropical es el factor que más limita la producción de alimentos en la región. El uso eficiente de los fertilizantes fosfatados para la producción de cultivos requiere un entendimiento básico tanto de las propiedades de los fertilizantes como de su reacción química en los suelos. Cuando esta información está disponible, es posible manejar los fertilizantes fosfatados para una utilización efectiva, tanto agronómica como económicamente, en un sistema complejo fertilizante-suelo-cultivo.

El propósito de este documento es revisar la información sobre: (1) la química de las reacciones del fósforo con los minerales de los suelos de América Latina Tropical, y (2) los factores que influyen en las reacciones de varios fertilizantes fosfatados no convencionales tales como las rocas fosfóricas (RF) y las rocas fosfóricas parcialmente aciduladas (RFPA), las cuales han ganado ahora un nuevo

---

<sup>a</sup>Coordinador de Química de Suelos y Director de la División Agroeconómica del International Fertilizer Development Center, Muscle Shoals, Alabama 35662.

<sup>b</sup>L.A. León se encuentra en Cali, Colombia, en el Proyecto Colaborativo IFDC/CIAT.

empuje en la investigación de la fertilización con fósforo en América Latina Tropical.

### Reacción de los Fertilizantes Fosfatados en los Suelos

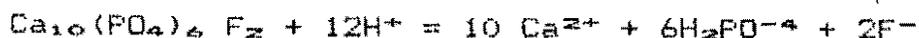
Cuando los fertilizantes fosfatados son aplicados, el primer paso en su reacción con los minerales del suelo es la disolución del fertilizante por el agua del suelo. La tasa de disolución depende principalmente de la reactividad química (solubilidad en agua y/o citrato) de los fertilizantes fosfatados, así como de las reacciones subsecuentes de los iones fosfatos liberados con los minerales del suelo. En esta sección, se discutirá la disolución y transformación de diferentes fertilizantes fosfatados de acuerdo con su solubilidad en agua y/o citrato.

#### **Fertilizantes Fosfatados Insolubles en Agua**

Rocas fosfóricas finamente molidas. Las rocas fosfóricas son insolubles en agua y tienen una solubilidad limitada en solución de citrato de amonio neutro. La solubilidad en citrato de las rocas fosfóricas depende de la composición química y mineralógica de la apatita en la roca fosfórica (Lehr y McClellan, 1972).

En general, la solubilidad en citrato se incrementa con el grado de sustitución de los carbonatos por fosfatos en la estructura de la apatita (Chien y Black, 1976; Chien, 1977a). La concentración de fósforo en la solución del suelo derivada de la disolución de rocas fosfóricas también se incrementa con el aumento de solubilidad en citrato (Figura 1).

La disolución de las rocas fosfóricas en la solución del suelo, tomando la fluorapatita como un ejemplo, puede expresarse simplemente como



De la ley de acción de masas, se puede ver claramente que la disolución de las rocas fosfóricas en la solución del suelo puede ser favorecida bajo la condición de que (1) el pH del suelo, (2) el calcio intercambiable, y (3) la concentración de fósforo en la solución del suelo sean bajas. En un estudio de incubación en invernadero con un Oxisol en Colombia, Hammond (1979) encontró que el efecto de la disolución de rocas fosfóricas en el pH del suelo variaba desde ningún efecto a un ligero incremento en el pH de 0.2 a 0.4 unidades, dependiendo de la roca fosfórica. Bajo condiciones de campo en el mismo suelo, Chien et al. (1987a), encontraron que un incremento en el pH del suelo fue observado en tratamientos con fósforo cinco años después de su aplicación.

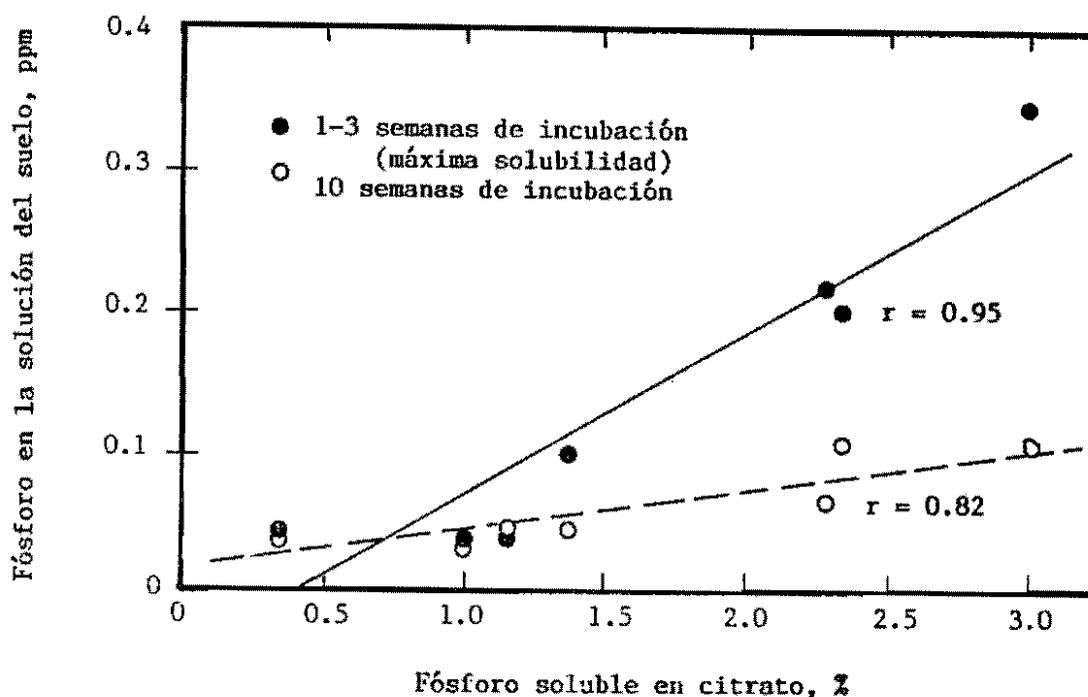


Figura 1. Relación entre la concentración de fósforo en la solución de un suelo ácido inundado tratado con rocas fosfóricas y su solubilidad en citrato (Chien, 1988b).

El incremento fue más alto con rocas fosfóricas (0.6 a 0.9 unidad) que con SFT (0.5 unidad). Se observaron pequeñas diferencias con las rocas fosfóricas de diferentes fuentes, lo que sugiere que la mayoría de las rocas fosfóricas aplicadas fueron probablemente descompuestas en el suelo después de un plazo largo de reacción.

El efecto de la disolución de las rocas fosfóricas en el incremento del calcio intercambiable (Figura 2) y la disminución en el aluminio intercambiable (Figura 3) fue reportado por Chien (1982) en un estudio de incubación en laboratorio con un Oxisol de Colombia. Una observación similar fue reportada por Hammond (1979). Sin embargo, Chien et al. (1987a) reportaron que aunque se observó un incremento en el calcio intercambiable con varios tratamientos de rocas fosfóricas no se observó ningún efecto aparente de los tratamientos con fósforo en el aluminio intercambiable después de un término largo de disolución de rocas fosfóricas en el suelo. Recientemente, Hellums et al. (1987) mostraron el efecto benéfico del calcio intercambiable proveniente de la disolución de rocas fosfóricas en la respuesta del cultivo a las rocas Bahía Inglesa (Chile), Bayovar (Perú) y Capinota (Bolivia) (Figura 4). Mientras que la buena respuesta al calcio de las dos

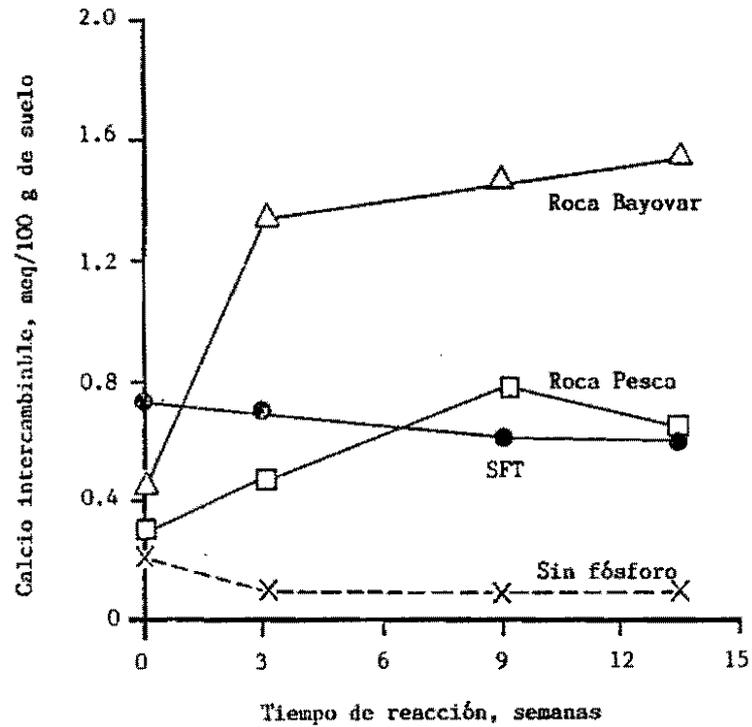


Figura 2. Calcio intercambiable durante la incubación de un suelo ácido de Colombia (Oxisol) tratado con SFT y rocas fosforicas (Chien, 1982).

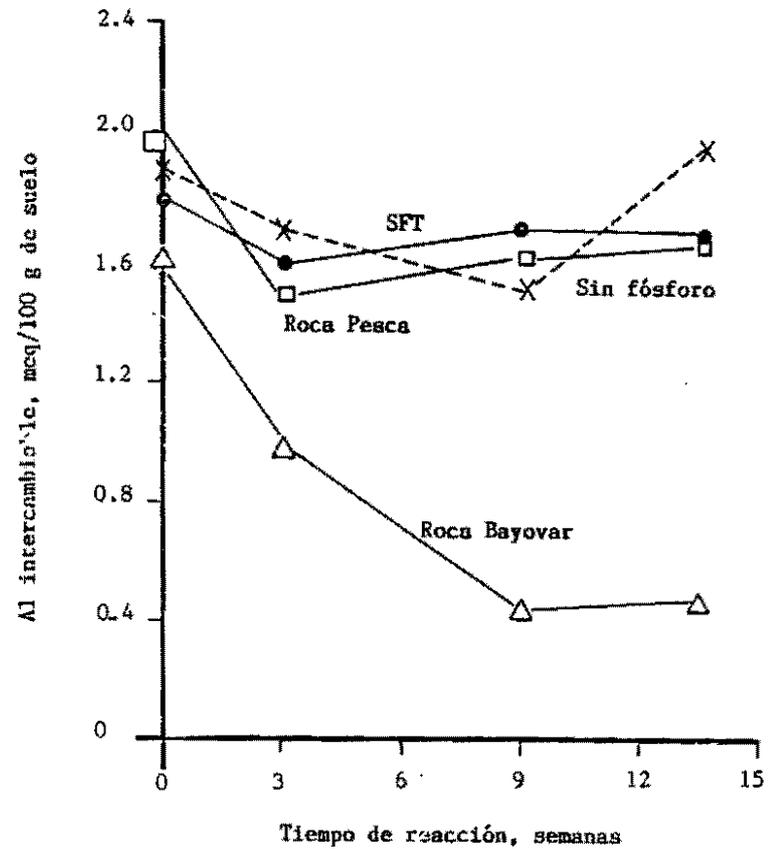


Figura 3. Aluminio intercambiable durante la incubación de un suelo ácido de Colombia (Oxisol) tratado con SFT y rocas fosfóricas (Chien, 1982).

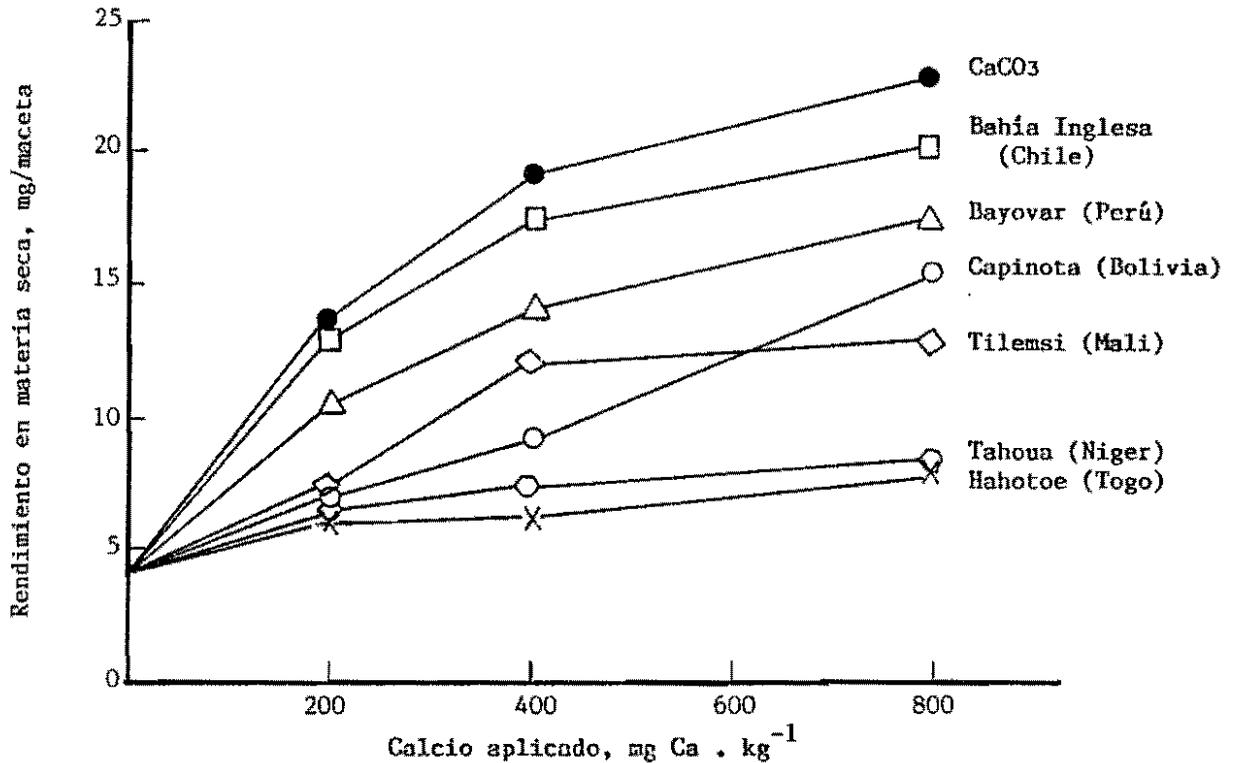


Figura 4. Rendimiento de maíz en materia seca obtenido con  $\text{CaCO}_3$  y con varias rocas fosfóricas en la presencia de 400 mg de P por kg (de suelo) como  $\text{KH}_2\text{PO}_4$  en un estudio en invernadero (Helmons et al., 1987).

primeras rocas fue debida a su alta reactividad, el efecto del calcio de la roca fosfórica Capinota, de baja reactividad, fue debida a su alto contenido de calcita libre (alrededor de 10%) antes que a la disolución del mineral apatito. Es necesario más investigación bajo condiciones de campo para estimar el valor potencial del calcio de las rocas fosfóricas reactivas o de las rocas con alto contenido de calcita libre.

El encalamiento de suelos ácidos siempre resulta en una reducción de la disolución de las rocas fosfóricas, debido al hecho de que tanto el pH del suelo como el calcio intercambiable aumentan con el encalamiento. Para separar el efecto del aumento del pH de el del calcio intercambiable, Khasawneh y Doll (1978) compararon el efecto del  $\text{CaCO}_3$  y el  $\text{SrCO}_3$  en la efectividad agronómica de la roca Carolina del Norte y encontraron que el  $\text{SrCO}_3$  disminuye menos el rendimiento de la planta que el  $\text{CaCO}_3$  al mismo pH del suelo después del encalamiento (Figura 5).

Aunque la disolución de la roca fosfórica es favorecida por la baja concentración de fósforo en la solución del suelo como sucede en los suelos ácidos con alta capacidad de fijación de fósforo (Figura 6), el fósforo disuelto puede no

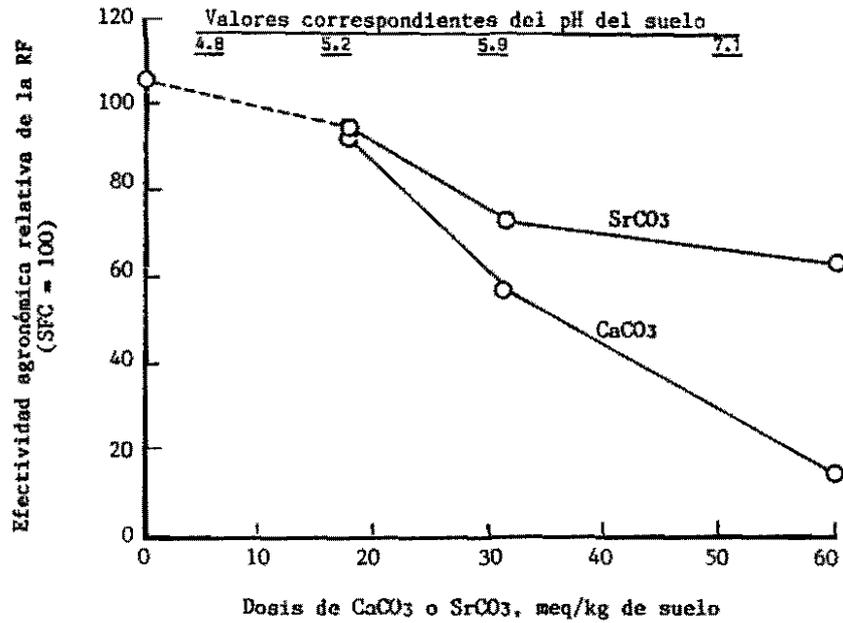


Figura 5. Efectividad agronomica relativa de la roca Carolina del Norte con SFC (SFT) influenciada por el encalamiento con CaCO<sub>3</sub> o SrCO<sub>3</sub> (Khasawneh and Doll, 1978).

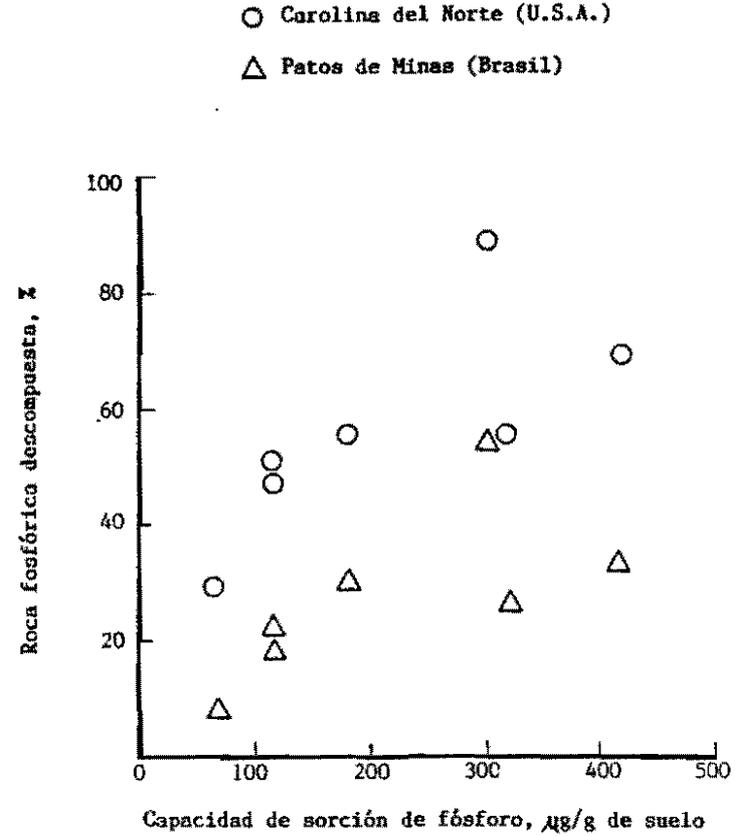


Figura 6. Descomposición de rocas fosforicas en suelos ácidos influenciada por la capacidad de sorción de fosphoro del suelo (Smyth and Schanze, 1982).

ser disponible para la planta debido a su rápida fijación por minerales como óxidos de hierro y aluminio. En un estudio en invernadero, Hammond et al. (1986a), encontraron que el fósforo (Bray I) en el suelo tratado con roca fosfórica Bayovar disminuye con el incremento en la capacidad de fijación de fósforo del suelo (Figura 7). Consecuentemente, el rendimiento de la planta obtenido con la RF Bayovar disminuye cuando aumenta la capacidad de fijación de fósforo del suelo. Conclusiones similares fueron también descritas por Syers y Mackay (1986) y Smyth y Sánchez (1982). Hammond et al. (1986b) concluyeron que las rocas fosfóricas finamente molidas aplicadas a Oxisoles de América Latina fueron relativamente más efectivas con respecto al SFT que las mismas fuentes aplicadas a suelos Andepts los cuales exhiben una capacidad de fijación de fósforo más alta que la que mostraron los Oxisoles y Ultisoles.

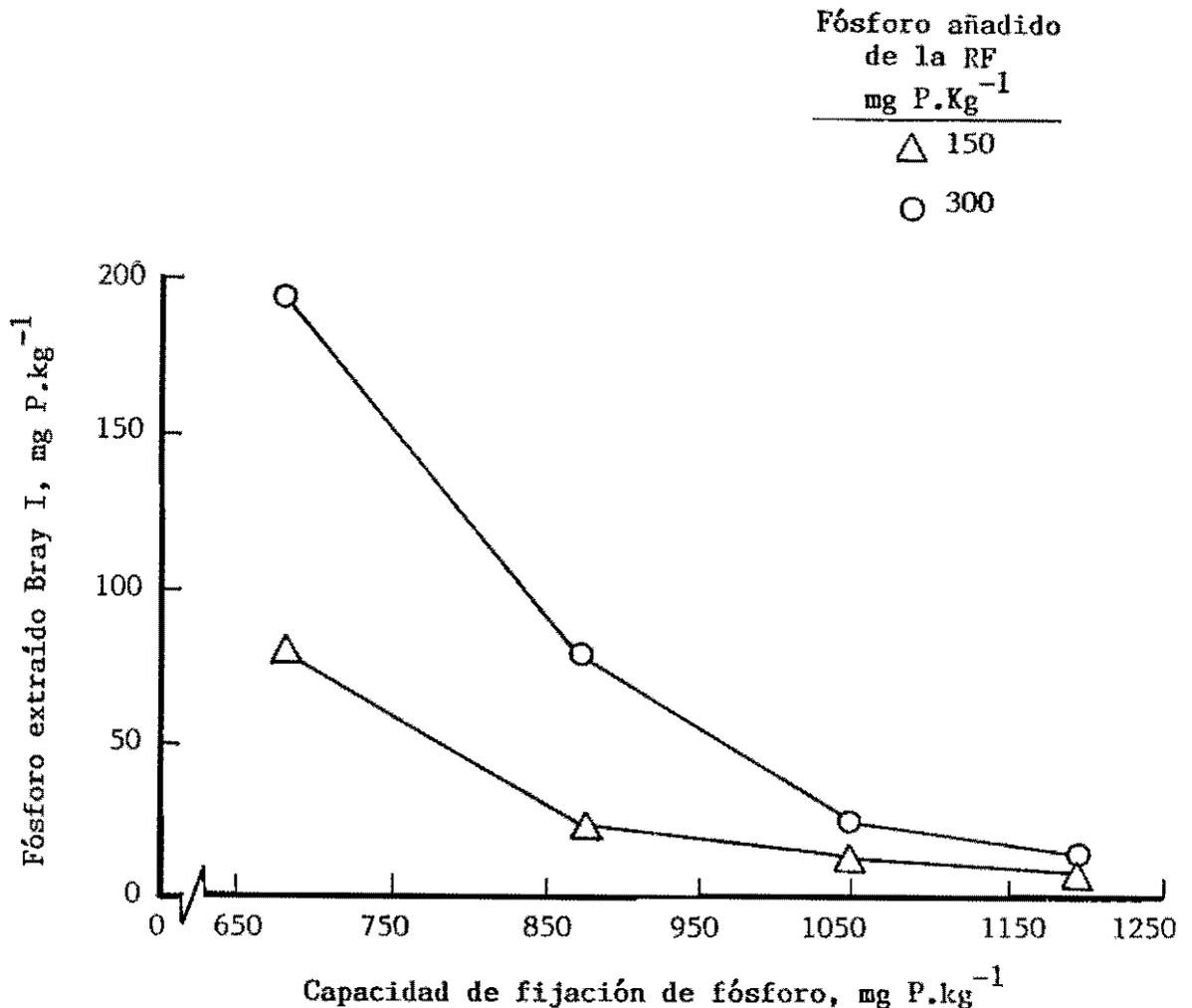


Figura 7. Fósforo extraído (BrayI) de un suelo tratado con roca Bayovar después de cultivado, influenciado por la capacidad de fijación de fósforo del suelo (Hammond et al., 1986 a).

Otro factor importante en la disolución de las rocas fosfóricas es la materia orgánica del suelo; ella puede formar un complejo con el ion  $\text{Ca}^{+2}$  y así bajar en la solución del suelo la concentración de  $\text{Ca}^{+2}$ , que a su vez, provee una fuerza de estímulo para la disolución de la roca fosfórica. La mezcla de urea con roca fosfórica puede, bajo ciertas condiciones, fomentar la disolución de la roca fosfórica en el suelo (Figura B). El mecanismo es que después de la hidrólisis de la urea el pH del suelo aumenta y resulta en más hidrólisis de la materia orgánica la cual luego forma complejos con los iones  $\text{Ca}^{+2}$  liberados de la disolución de la roca fosfórica. Algunos estudios de invernadero hechos por el IFDC (Chien et al., 1987b) y la TVA (Terman et al., 1969) han mostrado que la disponibilidad del fósforo de las RF fue más alta cuando se mezclan con urea que con  $\text{NH}_4\text{NO}_3$  ó  $\text{NH}_4\text{Cl}$ .

La transformación de la RF en suelos ácidos es similar a la de los superfosfatos con excepción de que la tasa de transformación es mucho más baja. El Cuadro 1 muestra el fraccionamiento del fósforo del suelo cinco años después de la aplicación de varias rocas fosfóricas y superfosfato triple a un Oxisol en Colombia para la producción de pasto. Aun con la roca de muy baja reactividad como la Pesca, casi el 80% de la roca fue descompuesta. La tasa de descomposición de las rocas fosfóricas en este suelo fue aparentemente más rápida de lo que se creía usualmente debía ser en los suelos temperados.

Cuadro 1. Fraccionamiento del fósforo del suelo y recuperación de P de roca fosfórica cinco años después de la aplicación de fertilizantes fosfatados a un Oxisol en Colombia (Chien et al., 1987).

Fuentes de fósforo	Al-P	Fe-P	Ca-P	Recuperación de RF-P (%)
	u P/g de suelo			
Pesca, Colombia	7.7	38.6	21.5	20.9
Tennessee, USA	6.1	37.3	15.5	14.0
Huila, Colombia	8.1	41.6	14.5	12.9
Gafsa, Tunes	11.2	50.3	12.0	10.0
C. Florida, USA	7.6	35.5	9.9	7.4
Bayovar, Perú	11.4	39.8	5.5	2.5
Superfosfato triple	15.3	50.9	6.4	-
Testigo (sin P)	3.1	27.5	3.3	-

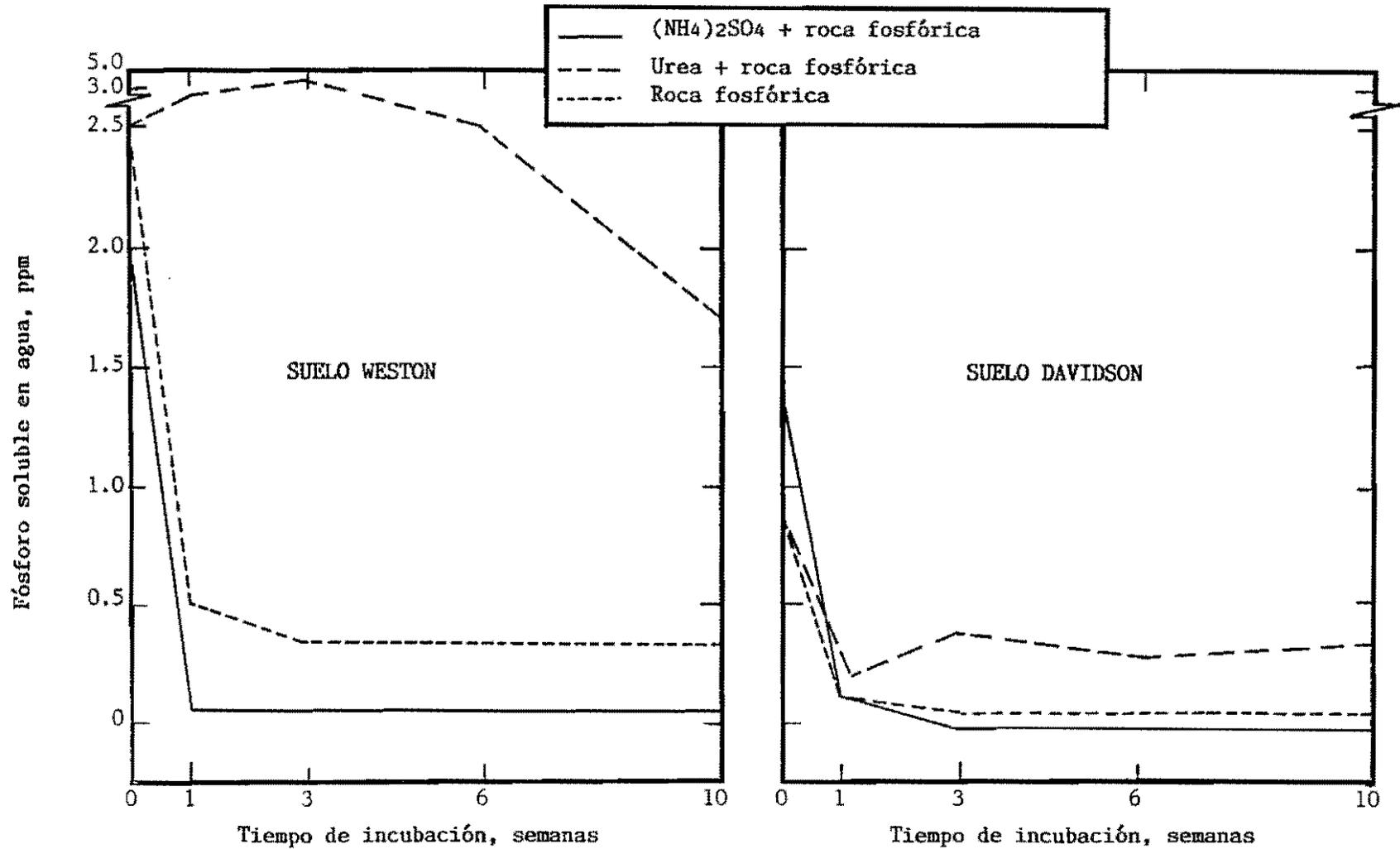


Figura 8. Fósforo soluble en agua en suelos tratados con roca Carolina del Norte, sola y en mezclas con fertilizantes nitrogenados (Chien, 1979).

Una ecuación Elovich modificada en la forma  $C_t = C_0 - (1/B) \ln (c/B) - (1/B) \ln t$ , ha mostrado ser el mejor modelo probado para describir la cinética de la disolución de las rocas fosfóricas en los suelos (Chien et al., 1980a). En la ecuación,  $C_t$  es la concentración de fósforo extractable en agua en el tiempo  $t$ ,  $C_0$  es la máxima concentración de fósforo cuando  $t = 0$  y  $\alpha$  y  $B$  son constantes. Un ejemplo de la curva Elovich se muestra en la Figura 9 con la roca Carolina del Norte en dos suelos ácidos colombianos.

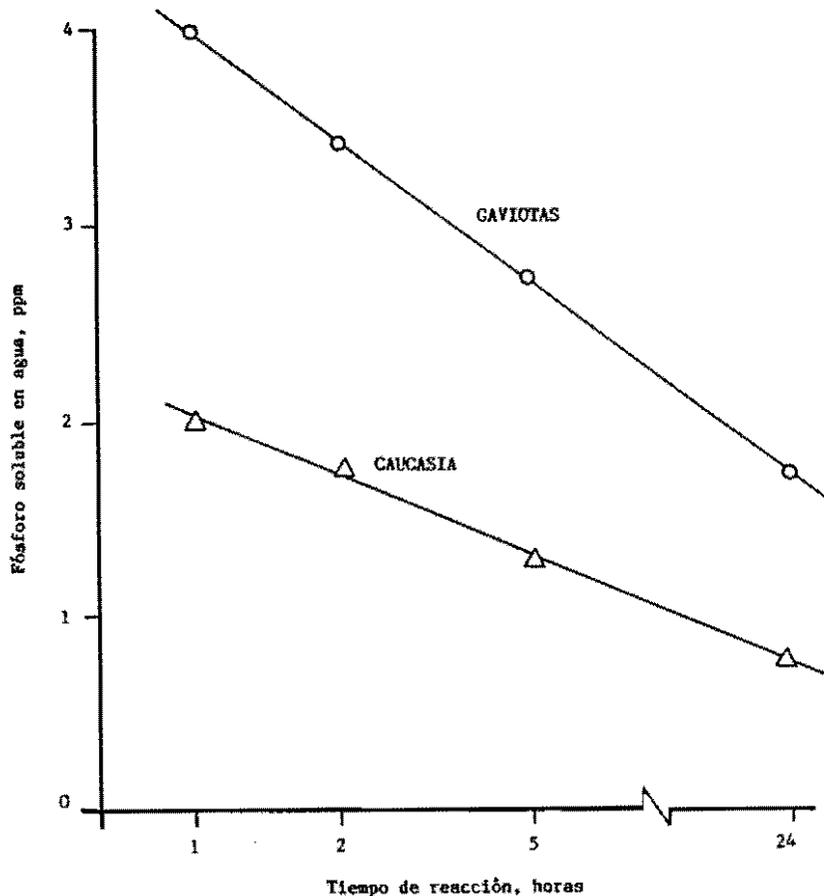


Figura 9. Gráfica de la ecuación Elovich para la disolución de la Roca Carolina del Norte en dos suelos ácidos de Colombia (Oxisol y Ultisol) (Chien et al., 1980 a).

Un estudio de Chien et al. (1980b) sobre la disolución de la roca Carolina del Norte en 16 suelos ácidos de Colombia, los dos parámetros cinéticos,  $\alpha$  y  $B$  correlacionaron más estrechamente con las cantidades de aluminio reactivo entre las propiedades de los suelos estudiados. Resultados de las pruebas con otros dos suelos ácidos de Colombia muestran que esta relación permite la predicción de la tasa de disolución de la roca en otros suelos a partir de la simple medida del contenido de aluminio reactivo (Figura 10). Se necesitan más trabajos para investigar si los parámetros cinéticos pueden también correlacionarse con la actual respuesta de los cultivos a las rocas fosfóricas en diferentes tipos de suelos en América Tropical.

Fosfatos fundidos. Los fosfatos fundidos son usualmente insoluble en agua pero casi totalmente solubles en citrato. Dos productos comunes son el fosfato Ca-Mg y el fosfato Rhenania. El primer producto es hecho por la fusión de rocas fosfóricas con minerales como la olivina o serpentina, y el segundo es hecho por la fusión de RF con  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  y  $\text{SiO}_2$ . La composición química y el contenido de fósforo en fosfatos fundidos puede variar dependiendo de la proporción de las materias primas y el proceso de fusión usado.

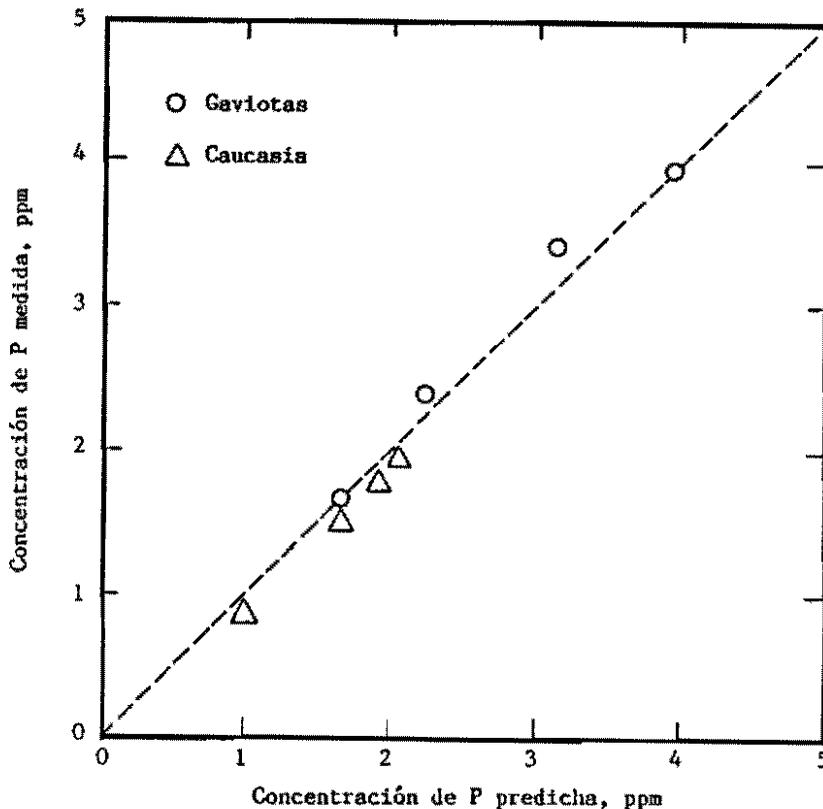


Figura 10. Concentración medida y predicha de P en extractos de agua de dos suelos tratados con Roca Carolina del Norte (Chien et al., 1980 b).

Los fosfatos fundidos usualmente funcionan igual o a veces mejor que los superfosfatos como una fuente fertilizante de fósforo en suelos ácidos, particularmente en aquellos suelos con alta capacidad de fijación de fósforo. En adición a la naturaleza de su baja tasa de liberación de fósforo (pero más rápido que las rocas fosfóricas), el silicato,  $\text{SiO}_3^{2-}$ , (no silice,  $\text{SiO}_2$ ) componente en los materiales, puede competir con los fosfatos por sitios de sorción de fósforo y por consiguiente reducir la capacidad de fijación de fósforo del suelo (Figura 11).

Otra ventaja de los fosfatos fundidos sobre los superfosfatos es que los fosfatos fundidos son materiales

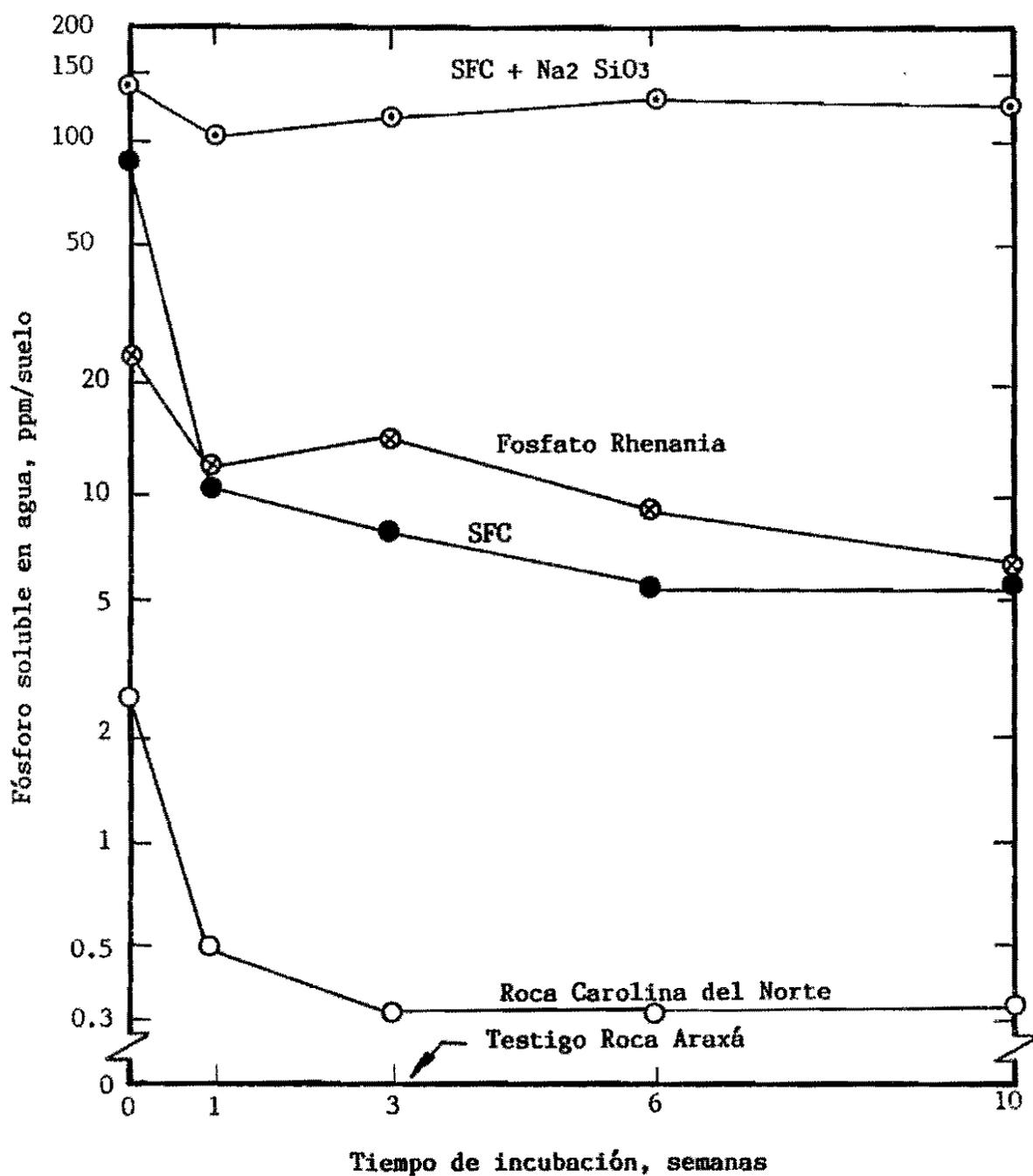


Figura 11. Fósforo soluble en agua después de las reacciones de varios fertilizantes fosfatados incluyendo SFC (SFT) con un suelo ácido (pH 4.5) durante la incubación (Chien, 1978).

alcalinos, y por lo tanto, ellos pueden también "encalar" los suelos ácidos y de este modo beneficiar la respuesta de la planta al fósforo.

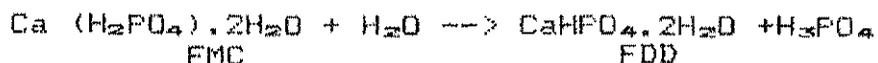
### Fertilizantes Fosfatados Parcialmente Solubles en Agua

Para las rocas fosfóricas de baja reactividad, que no son apropiadas para aplicación directa, el incremento de su solubilidad en agua ya sea por acidulación parcial o por mezcla con superfosfatos puede incrementar sustancialmente su efectividad agronómica. Hay tres maneras de producir este tipo de producto:

1. Acidulando parcialmente roca fosfórica con  $H_2SO_4$  ó  $H_3PO_4$  (rocas fosfóricas parcialmente aciduladas, RFFA).
2. Cogranular roca fosfórica con superfosfato simple o superfosfato triple.
3. Compactar roca fosfórica con superfosfato simple o superfosfato triple.

Las mezclas de rocas fosfóricas con superfosfatos hecha por cogranulación o compactación son también llamadas fosfatos extendidos. Se ha sugerido que las RFFA pueden ser tan efectivas o a veces mejores que los superfosfatos para suelos ácidos que poseen alta capacidad de fijación de fósforo (McLean y Wheeler, 1964; McLean y Legan, 1970). Las reacciones químicas del suelo pueden ahora ser explicadas de la siguiente manera:

Cuando el fosfato monocálcico monohidratado (FMC), que es el componente fosfórico en los superfosfatos, se disuelve en la solución del suelo, él se hidroliza y forma fosfato dicalcio dihidratado (FDD) y  $H_3PO_4$  en la forma siguiente:



La liberación de  $H_3PO_4$  puede llevar el pH del suelo tan bajo como 1.48 y así puede disolver los minerales de hierro y aluminio que a su vez reaccionan con el fósforo soluble en agua para formar fosfatos de Fe-Al insolubles en agua:



En el caso de las rocas parcialmente aciduladas, las cuales contienen tanto fósforo soluble en agua (componentes del FMC) y fósforo insoluble en agua (componente de la RF), parte del  $H_3PO_4$  producido por la hidrólisis del FMC será neutralizado por la roca fosfórica no acidulada. Esto no sólo protege el fósforo soluble en agua de la RFFA de reaccionar con cantidades sustanciales de Fe y Al sino que

también permite que sea liberado fósforo adicional de la reacción del ácido con la RF no acidulada, fósforo que va en forma de fósforo soluble en agua (Mokwunye y Chien, 1980).

Además, también se ha encontrado que la difusión de los iones de  $H_2PO_4^-$  del FMC en la solución del suelo fue incrementada en presencia de la roca fosfórica (Logan y McLean, 1977). Esta protección facilita a los iones fosfatos difundirse a una mayor distancia para ser tomados por las raíces de las plantas.

La efectividad agronómica relativa de las RFPA comparada con la de los superfosfatos depende de varios factores del suelo y de la planta. Un factor importante del suelo es la magnitud de la capacidad de fijación de fósforo. La Figura 12 muestra los niveles relativos de fósforo extractable en agua en tres suelos tratados con SFT, mezcla en polvo de RF y SFT, y RFPA minigranulada (0.1-0.3 mm). Se puede ver que el nivel relativo de fósforo extractable en agua de la RFPA se incrementa cuando la capacidad de fijación de fósforo aumenta. La RFPA granulada también fue más efectiva que la mezcla en polvo de RF y SFT. Todas estas observaciones tienden a apoyar observaciones de campo en las cuales las RFPA pueden ser superiores al SFT en los suelos ácidos con alta capacidad de fijación de P.

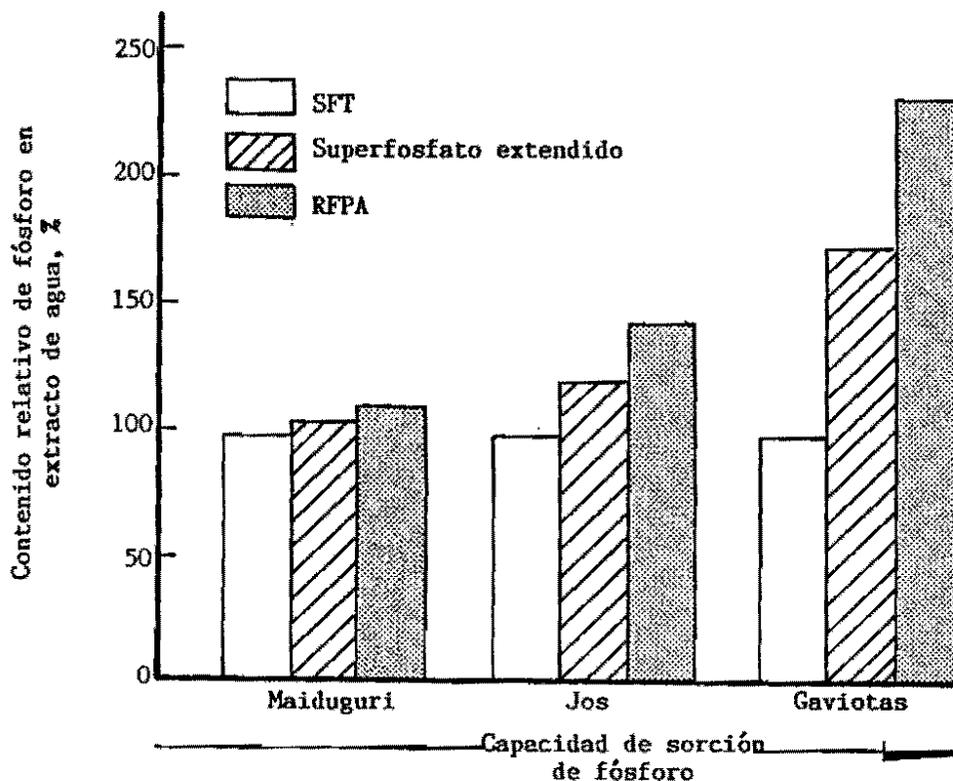


Figura 12. Efecto de la capacidad de fijación de fósforo en la solubilidad relativa en agua de la RFPA y fosfato extendido en tres suelos tropicales (Mokwunye and Chien, 1980).

Teóricamente, las RFPAs y los fosfatos extendidos (cogranulados o compactados) pueden funcionar igual de bien si ellos poseen la misma solubilidad en agua y en citrato y el mismo tamaño de partículas.

La Figura 13 muestra que, fosfatos compactados (RF + SFT) y RFPAs 50%  $H_2SO_4$  hechos de roca Huila fueron igual de eficientes agrónomicamente. Sin embargo, la RFPa-50%  $H_2SO_4$  hecha de roca Capinota se encontró que era menos efectiva que fosfato compactado (RF + SFT) hecho de la misma roca (Figura 14). Se encontró que la solubilidad y la efectividad agronómica pueden ser grandemente influenciadas por el contenido de  $Fe_2O_3 + Al_2O_3$  en la RF usada para la acidulación parcial con  $H_2SO_4$ . (Hammond et al., 1987). Aparentemente, el  $Fe_2O_3 + Al_2O_3$  reaccionan con el  $H_2SO_4$  y viene a ser activo para revertir algo del fósforo soluble en agua a P soluble en citrato y fósforo insoluble en citrato, lo que resulta en una disminución de la solubilidad en agua y de la efectividad agronómica de la RFPa como muestra la Figura 15. La selección de la RF para hacer la RFPa con  $H_2SO_4$  debe considerar la calidad de la RF así como los contenidos de  $Fe_2O_3 + Al_2O_3$ .

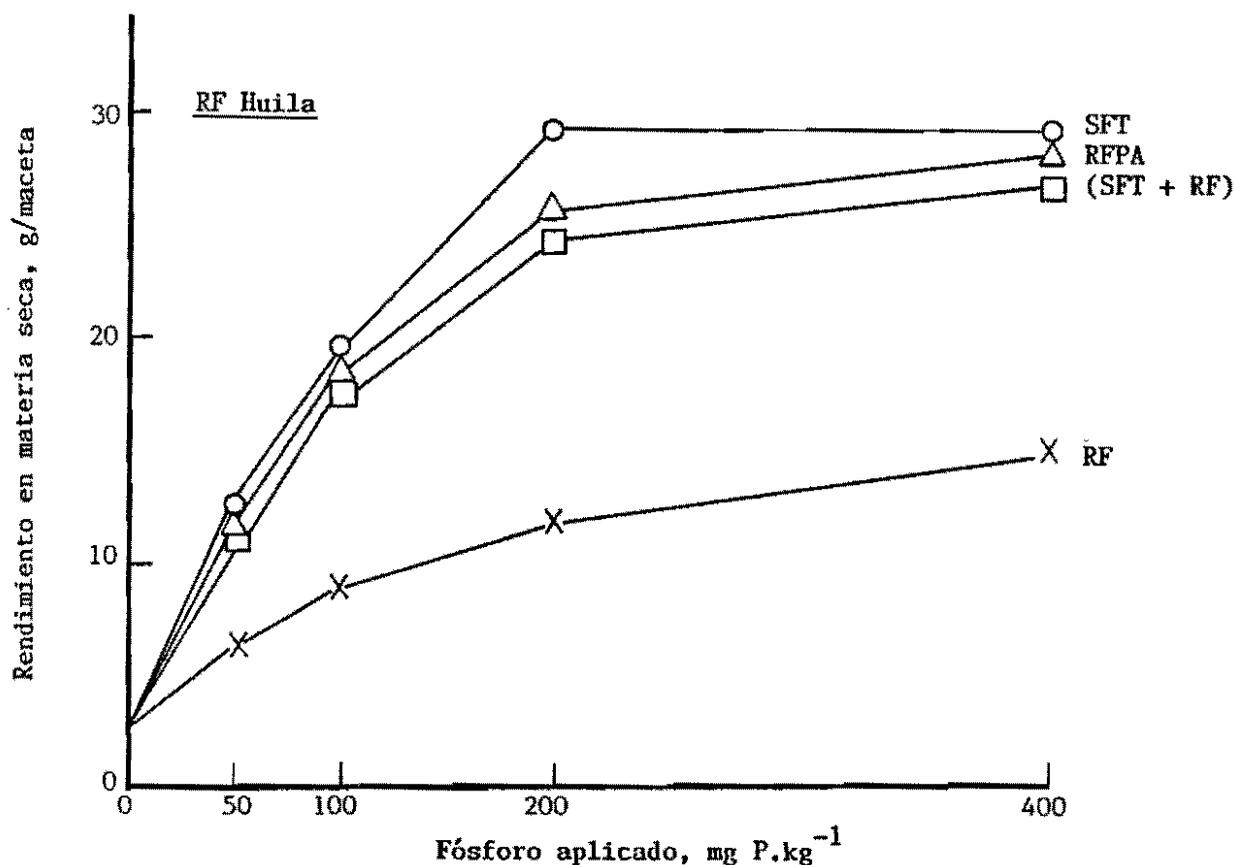


Figura 13. Rendimiento de maíz en materia seca obtenido con RF Huila, RFPa, roca compactada (SFT + RF), y SFT en un estudio en invernadero (Menon et al., 1987).

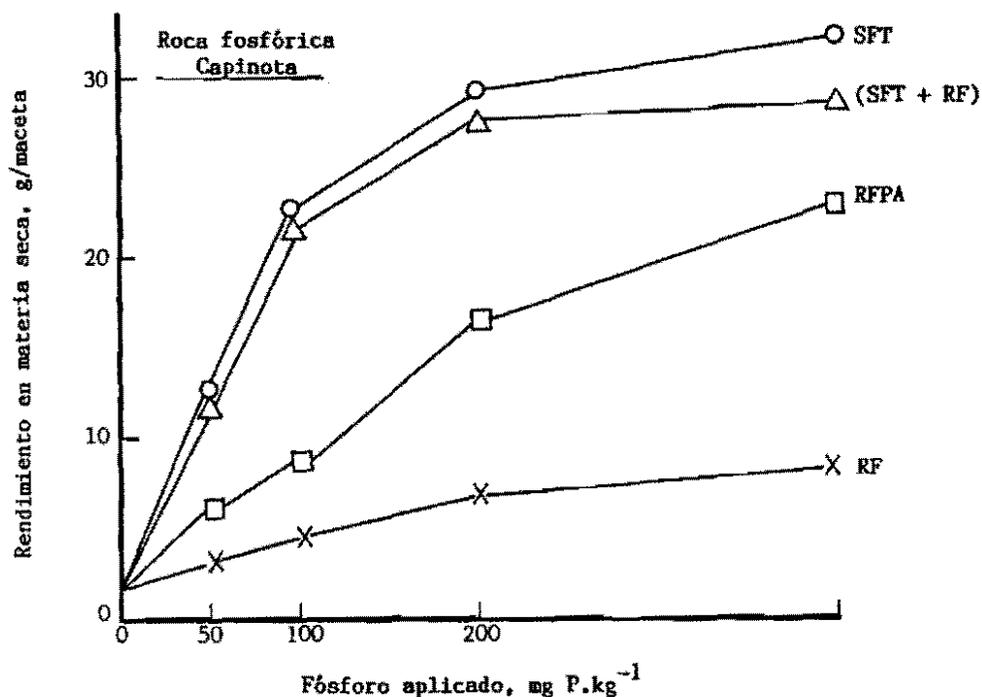


Figura 14. Rendimiento de maíz en materia seca obtenido con la roca fosfórica Capinota, RFPA, roca compactada (SFT + RF), y SFT en un estudio en invernadero. (Menon et al., 1987).

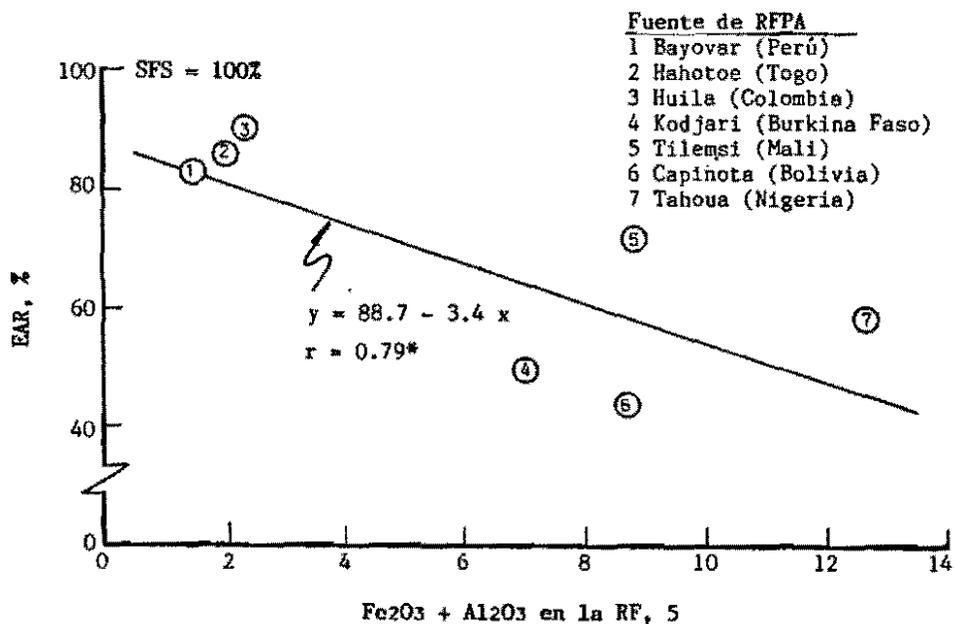


Figura 15. Efectividad agronómica relativa (EAR) en rendimiento de materia seca de maíz obtenido con RFPA en relación con el contenido de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> en las RF usando un nivel de acidulación del 50% con H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (Hammond et al., 1987).

## Fertilizantes Fosfatados Solubles en Agua

Los fertilizantes fosfatados solubles en agua más comúnmente usados incluyen SFS, SFT, MAP y DAP. La urea fosfatada es aún un producto experimental desarrollado por el TVA. Aunque ellos son todos solubles en agua, sus productos de reacción con el suelo no son siempre los mismos. Por ejemplo, la hidrólisis de FMC en los suelos es común con fertilizantes fosfatados de calcio, e.g., SFS y SFT, mientras que la hidrólisis de los fosfatos no toma lugar con los fertilizantes fosfatados de amonio, e.g. MAP y DAP. Hasta ahora, el FDCC ha sido identificado como el mayor producto inicial de SFT, mientras que el fosfato octocálcico (FOC),  $\text{Ca}_8\text{H}_2(\text{PO}_4)_6 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ , y la hidroxiapatita (HA),  $\text{Ca}_{10}(\text{OH})_2(\text{PO}_4)_6$  son los principales productos de reacción del DAP. Además, varios fosfatos de Ca-NH<sub>4</sub> tales como  $\text{Ca}(\text{NH}_4)_2(\text{HPO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$  y  $\text{CaNH}_4\text{PO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$  pueden también ser encontrados cuando el DAP reacciona con  $\text{CaCO}_3$  o en suelos calcáreos. El Cuadro 2 muestra una lista de compuestos de fósforo que fueron identificados como probables productos formados a partir de la reacción de fertilizantes fosfatados solubles en agua con suelos o con sus constituyentes. Debe mencionarse que los tipos de productos de reacción formados dependen de la naturaleza del fertilizante fosfatado, la química del suelo y su composición mineralógica.

Para describir la transformación de los compuestos fosfatados en los suelos, un diagrama de solubilidad de los fosfatos (Figura 16) ha sido usado frecuentemente. Los datos de los puntos que caen por encima de una línea dada indican suelos que son supersaturados con respecto al mineral representado por la línea, y puntos que caen por debajo de la línea indica sub-saturación. La supersaturación permite la precipitación de los minerales, mientras que la sub-saturación tiende a su disolución. Se puede ver también que los compuestos fosfatados de calcio son más estables a los más altos valores de pH, mientras que los compuestos fosfatados de hierro y aluminio son más estables a bajos valores de pH. En otras palabras, cuando los fertilizantes fosfatados se aplican a los suelos, comúnmente se encuentra que los fosfatos de hierro y aluminio podrían ser los productos de reacción formados en los suelos ácidos y los fosfatos de calcio podrían ser los productos de reacción en suelos calcáreos. Se podría poner en claro, sin embargo, que a menudo la tasa de transformación mineral es muy lenta y difícil de predecir excepto a través de la experimentación. El encalamiento de los suelos ácidos generalmente reduce la solubilidad del fósforo debido a la formación de fosfatos de calcio.

Muchos productos formados en la etapa inicial de la reacción de los fertilizantes fosfatados con el suelo son inestables y gradualmente cambian a compuestos fosfatados menos solubles. Por ejemplo, se ha reportado que la secuencia de

Cuadro 2. Resumen de los compuestos formados por la reacción de los fertilizantes fosfatados con el suelo y sus constituyentes (adaptado de Sample et al., 1980)

Compuesto	Nombre del mineral
$AlPO_4 \cdot 2H_2O$	Variscita
$AlPO_4 \cdot 2H_2O$	Metavariscita
$Al(NH_4)_2H(PO_4)_2 \cdot 4H_2O$	
$Al_2(NH_4)_2H(PO_4)_{11/4} \cdot H_2O$	
$Al_3(NH_4)_3H_6(PO_4)_8 \cdot 18H_2O$	$NH_4$ -taranakita
$AlNH_4PO_4OH \cdot 2H_2O$	
$AlNH_4PO_4OH \cdot 3H_2O$	
$Al_2NH_4(PO_4)_2OH \cdot 2H_2O$	
$Al_2NH_4(PO_4)_2 \cdot OH \cdot 8H_2O$	
$AlKH_2(PO_4)_2 \cdot H_2O$	
$Al_3K_3H_6(PO_4)_{10} \cdot 18H_2O$	K-taranakita
$Al_2K(PO_4)_2OH \cdot 2H_2O$	Leucofosfita
$AlKPO_4OH \cdot 0.5H_2O$	
$AlKPO_4OH \cdot 1.5H_2O$	
$Al_2K(PO_4)_2(F, OH) \cdot 3H_2O$	Minyulita
$CaHPO_4$	Monetita
$CaHPO_4 \cdot 2H_2O$	Brusita
$Ca_8H_2(PO_4)_6 \cdot 5H_2O$	Fosfato octocalcico
$Ca_{10}(PO_4)_6(OH)_2$	Hidroxiapatita
$Ca_{10}(PO_4)_6F_2$	Fluorapatita
$CaAlH(PO_4)_2 \cdot 6H_2O$	
$CaAlH_4(PO_4)_3 \cdot 20H_2O$	
$CaNH_4PO_4 \cdot H_2O$	
$Ca(NH_4)_2(HPO_4)_2 \cdot H_2O$	
$Ca_2NH_4H_7(PO_4)_4 \cdot 2H_2O$	Sal $NH_4^-$ -Flatt
$Ca_2(NH_4)_2(HPO_4)_3 \cdot H_2O$	
$CaKPO_4 \cdot H_2O$	
$CaK_3H(PO_4)_2$	
$Ca_2KH_7(PO_4)_4 \cdot 2H_2O$	Sal $K^-$ -Flatt
$CaFe_2H_6(PO_4)_4 \cdot 5H_2O$	
$CaFe_2H_4(PO_4)_4 \cdot 8H_2O$	
$Ca_3Mg_3(PO_4)_4$	
$FePO_4 \cdot 2H_2O$	Estringita
$FePO_4 \cdot 2H_2O$	Metaestringita
$Fe_3(PO_4)_2 \cdot 8H_2O$	Vivianita
$FeNH_4(HPO_4)_2$	
$Fe_3NH_4H_8(PO_4)_6 \cdot 6H_2O$	
$Fe_3KH_8(PO_4)_6 \cdot 6H_2O$	
$Fe_2K(PO_4)_2OH \cdot 2H_2O$	K-leucofosfita
$MgHPO_4 \cdot 3H_2O$	Nuevaberita
$Mg_2(PO_4)_2 \cdot 4H_2O$	
$Mg_3(PO_4)_2 \cdot 22H_2O$	
$MgNH_4PO_4 \cdot 6H_2O$	Estruvita
$Mg(NH_4)_2(HPO_4)_2 \cdot 4H_2O$	Esqueletita
$Mg_3(NH_4)_2(HPO_4)_4 \cdot 8H_2O$	Hamayita

(Continúa)

Cuadro 2. Resumen de los compuestos formados por la reacción de los fertilizantes fosfatados con el suelo y sus constituyentes (adaptado de Sample et al., 1980). (Continuación).

Compuesto	Nombre del mineral
$MgKPO_4 \cdot 6H_2O$	
$Mg_2KH(PO_4)_2 \cdot 15H_2O$	
$Al(NH_4)_2P_2O_7 \cdot OH \cdot 2H_2O$	
$Ca_2P_2O_7 \cdot 2H_2O$	
$Ca_3H_2(P_2O_7)_2 \cdot 4H_2O$	
$Ca(NH_4)_2P_2O_7 \cdot H_2O$	
$Ca_3(NH_4)_2(P_2O_7)_2 \cdot 6H_2O$	
$Ca_3(NH_4)_2(P_2O_7)_3 \cdot 6H_2O$	
$CaNH_4HP_2O_7$	
$Ca_2NH_4H_3(P_2O_7)_2 \cdot 3H_2O$	
$CaK_2P_2O_7$	
$Ca_3K_2(P_2O_7)_2 \cdot 2H_2O$	
$Ca_3K_2(P_2O_7)_3 \cdot 6H_2O$	
$Ca_2KH_3(P_2O_7)_2 \cdot 3H_2O$	
$Ca_2KH_3(P_2O_7)_2 \cdot 3H_2O$	
$CaNa_2P_2O_7 \cdot 4H_2O$	
$Fe(NH_4)_2P_2O_7 \cdot 2H_2O$	
$Mg(NH_4)_6(P_2O_7)_2 \cdot 6H_2O$	
$Mg(NH_4)_2H_4(P_2O_7)_2 \cdot 2H_2O$	
$Mg(NH_4)_2H_4(P_2O_7)_2 \cdot 2H_2O$	
$Ca(NH_4)_3P_3O_{10} \cdot 2H_2O$	

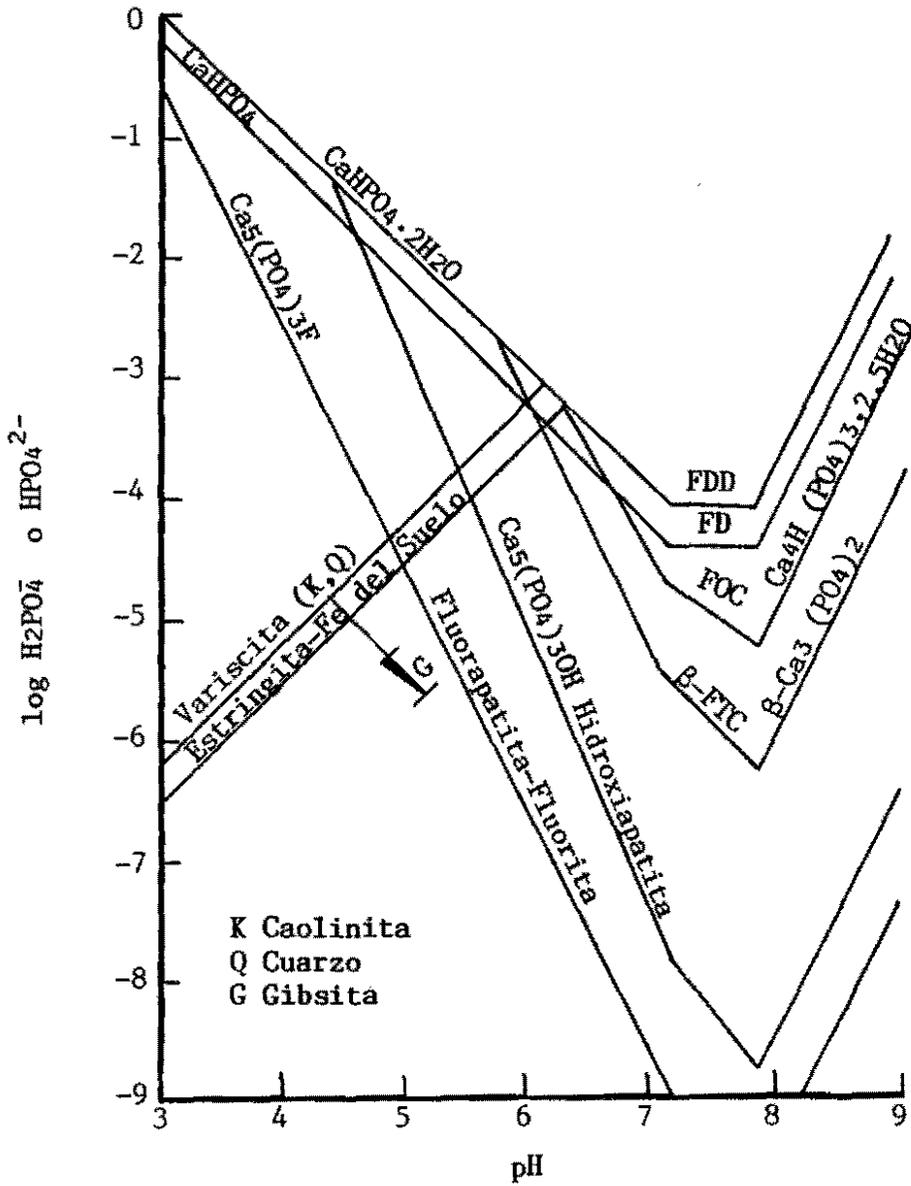


Figura 16. Un diagrama unificado de la solubilidad de fósforo en el suelo (Lindsay, 1979).

transformación del P procedente de FMC en suelos neutros o calcáreos siguen el orden de FMC, FDCC, FOC e HA (Lehr y Brown, 1958). La transformación de FDCC a FOC se incrementa con el aumento del pH del suelo, la temperatura, y el tiempo de reacción pero disminuye en presencia de magnesio (Bell y Black, 1970).

En contraste con la relativa buena definición de los trabajos en la identificación de los productos de reacción de los fertilizantes fosfatados en suelos neutros y calcáreos, existen muchos conflictos en los reportes de las formas de los productos de reacción en suelos ácidos. Muchos investigadores han asumido que los productos de reacción iniciales en los suelos ácidos son en su mayor parte fosfatos amorfos de Fe ó Al, los cuales se convierten a variscita o estringita después de prolongado envejecimiento. Sin embargo, Hsu (1982a, b) recientemente provee la evidencia al mostrar que fosfatos amorfos de aluminio, y no variscita, son los productos de reacción de fertilizantes fosfatados en suelos ácidos. El también arguye que una mezcla de estringita y metaestringita puede ocurrir en suelos con una concentración apropiada de  $Fe^{+3}$  y fosfato.

### Conclusión

La reacción de los fertilizantes fosfatados con el suelo es un sistema complejo en el cual la tasa de reacción y la forma de los productos de reacción depende del tipo de fertilizante fosfatado usado y la composición química y mineralógica del suelo en el cual el fertilizante fosfatado fue aplicado. Afortunadamente, nosotros tenemos un panorama general de los mecanismos de reacción del ion fosfato con los minerales del suelo, tanto de la adsorción superficial como del proceso de precipitación de compuestos. La información generada en los estudios de química del suelo de la reacción de los fosfatos con el suelo ha ayudado grandemente en el entendimiento y manejo de los fertilizantes fosfatados para la producción de cultivos. No obstante, aún se necesita investigación para conseguir información más comprensiva en esta importante materia en la aplicación de fertilizantes.

## REFERENCIAS

- Bell, L.C. and C.A. Black. 1970. "Transformation of Dibasic Calcium Phosphate Dihydrate and Octacalcium Phosphate in Slightly Acid and Alkaline Soils", Soils Sci. Soc. Amer. Proc., 34:583-587.
- Chien, S.H. 1977a. "Thermodynamic Considerations on the Solubility of Phosphate Rock", Soil Sci., 123:117-121.
- Chien, S.H. 1977b. "Dissolution of Phosphate Rocks in a Flooded Acid Soil", Soil Sci. Soc. Amer. J., 41:1106-1109.
- Chien, S.H. 1978. "Reactions of Phosphate Rock Rhenania Phosphate, and Superphosphate with an Acid Soil" Soil Sci. Soc. Amer. J., 42:705-708.
- Chien, S.H. 1979. "Dissolution of Phosphate Rock in Acid Soils as Influenced by Nitrogen and Potassium Fertilizers", Soil Sci., 127:371-376.
- Chien, S.H. 1982. "Direct Application of Phosphate Rocks in Some Tropical Soils of South America: A Status Report", In: Proceedings of the International Conference on Phosphorus and Potassium in the Tropics, pp. 519-529, The Malaysian Society of Soil Science, Kuala Lumpur, Malaysia, August 17-19, 1981.
- Chien, S.H. and C.A. Black. 1976. "Free Energy of Formation of Carbonate Apatites in Some Phosphate Rocks", Soil Sci. Soc. Amer. J., 40:234-239.
- Chien, S.H.; W.R. Clayton and G.H. McClellan. 1980a. "Kinetics of Dissolution of Phosphate Rocks in Soils", Soil Sci. Soc. Amer. J., 44:260-264.
- Chien, S.H.; L.A. León and H.R. Tejeda. 1980b. "Dissolution of North Carolina Phosphate Rock in Acid Colombian Soils as Related to Soil Properties", Soil Sci. Soc. Amer. J., 44:1267-1271.
- Chien, S.H.; L.L. Hammond and L.A. León. 1987a. "Long-Term Reactions of Phosphate Rocks With an Oxisol in Colombia", Soil Sci., (in press).
- Chien, S.H.; D. Sompongse; J. Henao and D.T. Hellums. 1987b. "Greenhouse Evaluation of Phosphorus Availability From Compacted Phosphate Rocks With Urea or With Urea and Triple Superphosphate", Fert. Res. (in press).

- Hammond, L.L. 1979. "Agronomic Measurements of Phosphate Rock Effectiveness", In: Seminar on Phosphate Rock for Direct Application, pp. 174-173, Special Publication IFDC-51, International Fertilizer Development Center (IFDC), Muscle Shoals, Alabama.
- Hammond, L.L.; S.H. Chien and G.W. Easterwood. 1986a. "Agronomic Effectiveness of Bayovar Phosphate Rock in Soil With Induced Phosphorus Retention", Soil Sci. Soc. J., 50:1601-1606.
- Hammond, L.L.; S.H. Chien and A.U. Mokwunye. 1986b. "Agronomic Value of Unacidulated and Partially Acidulated Phosphate Rocks Indigenous to the Tropics", Adv. Agron., 40:89-140.
- Hammond, L.L.; S.H. Chien and A.H. Roy. 1987. "Solubility and Agronomic Effectiveness of Partially Acidulate Phosphate Rocks as Influenced by Their Iron and Aluminum Oxide Content", (unpublished manuscript).
- Hellums, D.T.; S.H. Chien and J.T. Touchton. 1987. "Potential Calcium Values of Some African and Latin American Phosphate Rocks for Direct Application", (unpublished manuscript).
- Hsu, P.H. 1982a. "Crystallization of Variscite at Room Temperature", Soil Sci., 133:305-313.
- Hsu, P.H. 1982b. "Crystallization of Iron (III) Phosphate at Room Temperature", Soil Sci. Soc. Amer. J., 46:928-932.
- Khasawneh, F.E. and E.C. Doll. 1978. "The Use of Phosphate Rock for Direct Application", Adv. Agron., 30:159-206.
- Lehr, J.R. and W.E. Brown. 1958. "Calcium Phosphate Fertilizers: II. A Petrographic Study of Their Alteration in Soils", Soil Sci. Soc. Amer. Proc., 22:29-32.
- Lehr, J.R. and G.H. McClellan. 1972. A Revised Laboratory Reactivity Scale for Evaluating Phosphate Rocks for Direct Application, Bulletin Y-43, Muscle Shoals, Alabama.
- Lindsay, W.L. 1979. Chemical Equilibria in Soils, Wiley-Interscience, New York, New York.
- Logan, T.J. and E.O. McLean. 1977. "Diffusion of  $^{32}\text{P}$  From Partially Acidulated Rock Phosphate", Soil Sci., 123:203-206.

- McLean, E.O. and R.W. Wheeler. 1964. "Partially Acidulated Rock Phosphate as a Source of Phosphorus to Plants: I. Growth Chamber Studies", Soil Sci. Soc. Amer. Proc. 28:545-550.
- McLean, E.O. and T.J. Logan. 1970. "Sources of Phosphorus for Plants Grown in Soils of Different Phosphorus Fixation Tendencies", Soil Sci. Soc. Amer. Proc., 34:907-911.
- Menon, R.G. and S.H. Chien. 1987. "Effect of Compaction of Phosphate Rock with Urea, TSP, and Potassium Chloride on Phosphorus Availability to Maize", (unpublished manuscript).
- Mokwunye, A.U. and S.H. Chien. 1980. Reactions of Partially Acidulated Phosphate Rock with Soils From the Tropics", Soil Sci. Soc. Amer. J., 44:477-482.
- Sample, E.C.; R.J. Soper and G.J. Racz. 1980. "Reactions of Phosphate Fertilizers in Soils", In: The Role of Phosphorus in Agriculture, pp. 263-310, F.E. Khasawneh, E.C. Sample and E.J. Kamprath (eds.), American Society of Agronomy, Madison, Wisconsin.

**II. Evaluación Agronómica de Fertilizantes Fosfatados en  
América Latina**

#### 4. APLICACION DIRECTA DE ROCA FOSFORICA EN SUELOS DE MEXICO

Roberto Núñez Escobar\*

##### RESUMEN

México consume anualmente más de 1.5 millones de toneladas de roca fosfórica como materia prima para la producción de superfosfatos simple y triple y fosfato diamónico. A pesar de que existen en el país unos 13 millones de hectáreas de suelos ácidos, de los cuales unos 2 millones reciben fertilización fosfatada, no se acostumbra la aplicación directa de roca fosfórica como fertilizante. Desde 1972 se han realizado estudios comparativos de la eficiencia agronómica de rocas fosfóricas de distintos orígenes, pero a partir de 1980 estos trabajos se han orientado preferencialmente a la roca fosfórica de la península de Baja California (RFBC), por ser los yacimientos de mayor importancia y porque dicho material muestra una reactividad alta. En estudios de invernadero y campo conducidos para evaluar la eficiencia agronómica de la RFBC, se ha encontrado que en más del 80% de los casos la eficiencia de la RFBC supera al 40% de la obtenida con SFT, lo cual se considera ventajoso, ya que el costo del fósforo en la roca fosfórica es de sólo el 30% del correspondiente al SFT. Por otra parte, la adición de azufre a la RFBC invariablemente eleva su eficiencia agronómica, igualándola en algunos casos al SFT, con un incremento de sólo 10% en el costo del fósforo fertilizante.

##### Los Suelos Ácidos de México

Dado que la posibilidad del uso económico de la roca fosfórica como fertilizante se circunscribe a los suelos ácidos, es de interés conocer la superficie ocupada por estos suelos en la República Mexicana. En el Cuadro I se reporta la superficie ocupada por los suelos ácidos de México, según la clasificación de la F.A.O. (Dirección General de Agrología, 1973). De acuerdo con este estudio, la superficie total ocupada por los suelos ácidos en la República Mexicana es de 13.128 millones de hectáreas, lo que representa el 6.7% del territorio nacional. Estos suelos se ubican principalmente en la zona intertropical, con abundante precipitación. Un total de 8.373 millones de hectáreas de suelos ácidos corresponden a Andosoles,

---

\*Profesor-Investigador del Centro de Edafología, Colegio de Postgraduados, Chapingo, México.

principalmente vítricos y se ubican en el Eje Neovolcánico, que atravieza el país desde los Tuxtles, al Sur de Veracruz, en el Golfo de México, hasta Mayarit y Colima en el Océano Pacífico. En segundo orden de importancia se encuentran los Gleysoles, Cambisoles, Acrisoles y Nitosoles (estos dos últimos corresponden a los Ultisoles de la clasificación americana), que se localizan principalmente en la zona lluviosa de Tabasco, Chiapas y Sur de Veracruz.

Cuadro 1. Superficie ocupada por los suelos ácidos en la República de México, según la clasificación FAO-UNESCO (Dirección General de Agrología, 1973)

Unidad y subunidad	Superficie (10 <sup>3</sup> ha)
Gleysol mólico	1.717.3
Gleysol húmico	413.9
Cambisol districo	846.9
Cambisol húmico	9.5
Andosol húmico	746.6
Andosol átrico	292.1
Andosol vítrico	7.334.3
Planosol districo	139.0
Acrisol órtico	641.1
Acrisol férrico	139.5
Acrisol plíntico	56.4
Acrisol gléyco	42.5
Nitosol districo	626.8
Histosol districo	122.4
Total	13.128.3

Los suelos ácidos del Sureste de México están dedicados principalmente a pastizales o al cultivo de café, cacao, arroz, yuca, plátano, caña de azúcar o piña, mientras que los de mayor altitud, clasificados en su mayor parte como Andosoles, están ocupados por bosques de coníferas o dedicados al cultivo de maíz, papa o frutales caducifolios de clima templado.

Del total de suelos ácidos de la República Mexicana, unas seis millones de hectáreas están cubiertas de bosque y aproximadamente cinco millones de hectáreas están dedicadas a pastizales y aunque tanto en especies forestales como en pastos se ha detectado una insuficiencia natural de fósforo, su fertilización todavía no es una práctica usual. Los aproximadamente dos millones de hectáreas de suelos ácidos restantes son los dedicados a la agricultura, en los que habitualmente se aplican fertilizantes fosfatados de alta solubilidad, en dosis que van de los 40 a los 150 kg de  $P_2O_5$  por hectárea. Los fertilizantes fosfatados usuales son superfosfatos simple, triple o fosfato diamónico. No se acostumbra la aplicación directa de roca fosfórica.

### El Consumo y las Reservas de Fosfatos Naturales en México

Durante 1986 México importó 1.235 millones de toneladas de roca fosfórica de cuatro países (Cervantes, 1987), según se observa en el Cuadro 2. La producción nacional fue de 600.000 toneladas, lo que totaliza un consumo de 1.835 millones de toneladas. A pesar de las abundantes reservas nacionales, la producción local cubrió únicamente el 32.7% del requerimiento nacional.

Las exploraciones geológicas hechas en México han descubierto yacimientos de roca fosfórica en los estados de Baja California Norte y Sur, Coahuila, Nuevo León, Durango, Tamaulipas, Zacatecas, San Luis Potosí, Querétaro, Hidalgo y Oaxaca. Los yacimientos de Coahuila, Zacatecas y Nuevo León corresponden a un manto interestratificado en caliza. El de San Luis Potosí está constituido principalmente por fosfatos de aluminio. Los demás depósitos continentales constituyen pequeñas reservas, mientras que los de la península de Baja California son los más importantes y están formados por acumulaciones submarinas de nódulos de fosforitas y arenas fosfóricas, así como por yacimientos en el interior de la península (Mendoza 1980).

De acuerdo con Cervantes (1987), los cinco yacimientos de roca fosfórica y las nueve zonas de exploración en la península de Baja California totalizan 6.890 millones de toneladas de mineral, clasificado en 778 millones de toneladas de reservas medidas, 579 millones de toneladas de reservas iniciadas y 5.533 millones de toneladas de reservas inferidas, aunque en su mayor parte se trata de reservas de baja ley, como se aprecia en el Cuadro 3.

Las rocas fosfóricas del interior de la República en general han mostrado baja reactividad, lo que las hace inapropiadas para aplicación directa. Boy (1978) reporta índices de solubilidad absoluta en citrato (ISAC), de 3.3 y 7.1 para las rocas de Saltillo y Zimapán, respectivamente; en cambio las rocas de Baja California tienen valores de ISAC que varían de 10.8 a 15.9, lo cual desde un principio hizo

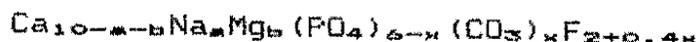
Cuadro 2. Volúmenes y procedencia de la roca fosfórica consumida en México durante 1986 (Cervantes, 1987).

Origen	Toneladas
Producción local:	
Baja California	457.646
Zimapan y otros	142.354
Importaciones:	
Israel	28.000
Jordania	29.600
Marruecos	834.400
Estados Unidos	343.000
Total	1.835.000

Cuadro 3. Volúmenes y ley de los distintos yacimientos de roca fosfórica de Baja California (Cervantes, 1987).

Localización	Volumen (10 <sup>4</sup> t)	Ley (% P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )
San Juan de la Costa Punta Coyote	38.5	20.0
Arenas San Juanico y Santo Domingo	1000.0	4.8
Tembabiche, capa Aguilera	44.0	26.4
Tembabiche, capa del Castillo	66.0	22.1
San Hilario, capa inferior	114.0	12.7
San Hilario capa superior	223.0	13.1
Santa Rita	2942.0	6.4
Banco Ranger	200.0	14.8

suponer una eficiencia agronómica aceptable en aplicación directa a suelos ácidos. La mayor reactividad de las rocas fosfóricas de Baja California se debe principalmente a la sustitución del ión fosfato por carbonato en la estructura de la apatita, dando origen a la francolita. Dentro de la fórmula general de la francolita;



las rocas de Saltillo y Zimapán tienen valores de 0.09 y 0.14 para el subíndice "a", de 0.04 y 0.06 para "b" y de 0.38 y 0.58 para "x" respectivamente; por el contrario, las rocas de Baja California han mostrado valores de "a" entre 0.23 y 0.29; para "b" los valores fluctúan entre 0.08 y 0.11, y para "x" los valores van de 0.79 a 1.06 (Boy, 1978).

### Evaluación Agronómica

Hasta antes de 1979, prácticamente todas las investigaciones en suelos mexicanos sobre eficiencia agronómica de rocas fosfóricas, fueron hechas con materiales importados o procedentes de la parte continental del país, ya que no se disponía de información ni de muestras de roca fosfórica de Baja California; pero a partir de 1979, las investigaciones de este tipo invariablemente las han incluido.

Etchevers et al. (1986) compilaron y analizaron críticamente la mayor parte de la información disponible sobre investigación agronómica con roca fosfórica en México hasta ese año. En esta sección, y en la de acidulación parcial, prácticamente se transcribe una parte de aquella revisión bibliográfica.

Aparentemente el primer trabajo realizado en México con roca fosfórica aplicada a suelos de origen volcánico lo realizó Gil (1966), quien estudió en invernadero la respuesta del maíz a la aplicación de roca fosfórica (34.5%  $\text{P}_2\text{O}_5$ ) de procedencia norteamericana, acidulada al 0, 20, 40 y 80% con  $\text{H}_2\text{SO}_4$  en tres suelos de la Sierra Tarasca. Como fertilizante de comparación empleó superfosfato triple. Todos los tratamientos fueron aplicados en una dosis equivalente a 220 kg  $\text{P}_2\text{O}_5$ /ha. Los suelos empleados estaban constituidos mayoritariamente por material amorfo y su pH en la profundidad 0-15 cm fluctuaba entre 5.7 y 6.1.

Los resultados obtenidos por Gil (1966) indican que el rendimiento de materia seca al aplicar roca fosfórica sin acidular, fue más alto que el del tratamiento sin fósforo, sin embargo, el rendimiento que se alcanzó en el tratamiento con superfosfato triple fue más del doble que el obtenido con la roca fosfórica sola. Los rendimientos de materia seca obtenidos con roca fosfórica acidulada al 40% fueron casi iguales a los obtenidos con superfosfato triple, sin diferencia significativa entre ellos. Gil concluyó que

sería suficiente acidular la roca fosfórica al 40% para obtener una respuesta adecuada en este tipo de suelos. Resultados similares han sido reportados posteriormente por otros investigadores que han trabajado con roca acidulada y los cuales se discuten más adelante en esta sección.

Al comparar la absorción de fósforo con el rendimiento de materia seca reportados por Gil (1966), se observó que cuando no se aplicó tratamiento alguno al suelo, la absorción de este elemento fue baja, al igual que los rendimientos. Sin embargo, al aplicar roca fosfórica cruda, el aumento de la absorción de fósforo fue mayor que el aumento observado en el rendimiento. Estos resultados indicarían que el fósforo de la roca fosfórica cruda es relativamente disponible para las plantas y que la disponibilidad de éste, aumenta con los tratamientos ácidos.

### Acidulación Parcial

Una forma de aumentar la efectividad de los tratamientos con roca fosfórica es someterla a un proceso de acidulación directa con un ácido. Marval (1975), en un experimento de invernadero comparó el efecto del superfosfato triple con el de la roca fosfórica de Marruecos acidulada al 0, 25, 50, 75 y 100% con ácido fosfórico y el de otras substancias fosfatadas. El tratamiento con ácido rindió productos con porcentajes de  $P_2O_5$  de 31.1, 42.1, 47.1, 50.4 y 52.9%, respectivamente. Algunas características químicas de los suelos y los rendimientos de materia seca de la planta indicadora se presentan en el Cuadro 4.

En general, se observó respuesta a la aplicación de roca fosfórica sin acidular en los suelos de pH neutro y ácido, aún cuando los rendimientos obtenidos con este tratamiento fueron inferiores a los obtenidos con superfosfato triple. La acidulación de la roca fosfórica produjo en casi todos los casos aumentos de rendimiento, no se observaron diferencias de importancia entre los diversos grados de acidulación. Según el autor, la acidulación al 25% es tan efectiva como el superfosfato triple. Este valor de acidulación es similar al reportado por Gil (1966) y Alvarez et al. (1981). El usar roca fosfórica acidulada al 25% en los suelos de pH neutro y ácido podría significar un ahorro importante del consumo de ácido fosfórico normalmente empleado en la elaboración de superfosfato triple.

Debe destacarse que la roca fosfórica tuvo un efecto más lento en el suelo Andosol. Ello podría deberse a la formación en el suelo de ciertos compuestos fosfatados de escasa disponibilidad inicial para las plantas. Otro efecto comentado por Marval (1975), es que el fósforo residual disponible medido según el método Bray-1 no fue un buen criterio para evaluar la eficiencia de los fertilizantes. La información presentada por este autor sugiere que la roca

Cuadro 4. Efecto de la fertilización con roca fosfórica de Marruecos (31.1%  $P_2O_5$ ) cruda y acidulada y otros fertilizantes fosfatados sobre el rendimiento en materia seca (g/maceta) de Lolium perenne en cuatro suelos mexicanos. (Marval, 1975).

S u e l o s *				
Tratamiento <sup>b</sup>	Mollisol	Calcáreo	Alfisol	Andosol
Testigo	3.3	10.4	2.5	12.2
RF 0	6.3	11.6	10.8	17.2
RF 25	15.1	16.5	19.1	19.3
RF 50	15.2	17.9	20.1	19.4
RF 75	14.9	19.3	21.3	21.8
RF 100	14.8	17.1	20.7	21.3
ST	14.4	18.2	20.1	19.9
MagAmp	-	15.5	-	21.4
CP	-	15.8	-	19.9
DNS (P=0.05)	2.7	3.7	2.4	3.8
C.V. (%)	9.5	9.7	6.2	8.7

\* Mollisol = pH 7.1 y P Bray-1 3.5 ppm; Calcáreo = pH 7.8 y P Bray-1, 4.8 ppm; Rojo (Charanda) Alfisol = pH 6.3 y P Bray-1, 0.9 ppm; y, Andosol = pH 5.5 y P Bray-1, 1.1 ppm.

<sup>b</sup> RF 0, 25, 50, 75 y 100 = roca fosfórica acidulada al 0, 25, 50, 75 y 100%;  
ST = Superfosfato triple; MagAmp = Fosfato amónico, magnésico, potásico; y  
CP = Roca fosfórica, amónica, magnésica acidulada.

fosfórica da mejores resultados en los suelos ácidos que en los neutros o alcalinos. Es en los primeros donde se ha concentrado la atención de los estudios destinados a substituir parcialmente el uso de fertilizantes fosfatados solubles por roca fosfórica. Sin embargo, los resultados del trabajo de Novoa y Núñez (1974) indican que la roca

fosfórica-úrea podría tener posibilidades de empleo como fuente de fósforo en suelos neutros con alta disponibilidad de este elemento.

Arroyave et al., (1979) estudiaron la respuesta a 90 y 60 kg de  $P_2O_5$ /ha aplicando como fuente roca fosfórica de Zimapán, Hidalgo, cruda y parcialmente acidulada al 25, 50 75 y 100% con ácido fosfórico, aplicada en banda y al voleo, en forma de gránulos y en polvo, en dos suelos Andosoles (El Capulín y Santa María del Monte) y un Mollisol (San Juan). En los sitios El Capulín y Santa María del Monte se aplicó 80 Kg N/ha, a todos los tratamientos en tanto que en San Juan la fertilización nitrogenada fue de 100 kg N/ha.

Los valores de pH y P disponible Bray-1 (0-30 cm) para los tres sitios experimentales fueron: pH 6.3, 5.9 y 6.3; y, P 4.4, 15.1 y 27.2 ppm, respectivamente. Como cultivo indicador se utilizó maíz de temporal y como fertilizante de comparación superfosfato triple en dosis crecientes. En el Cuadro 5 se presentan los resultados de estos experimentos.

Los valores de fósforo disponible (Bray-1) de los suelos seleccionados para este estudio sólo permitieron la manifestación de respuesta a la aplicación de la roca fosfórica en el sitio El Capulín. En este lugar se pudo observar que no hubo efecto benéfico de la roca cruda o acidulada sobre el rendimiento de grano cuando se aplicó antes de la siembra en polvo y al voleo, como tampoco al aplicarse en banda, ya fuera cruda o acidulada al 25%. En contraste, se obtuvo en general, excelente respuesta a la aplicación de la roca acidulada cuando fue aplicada granulada al momento de la siembra, tanto en banda como al voleo. Una tendencia similar a la observada con el rendimiento de grano se manifestó en la extracción de fósforo por las plantas y el grano, indicando que la roca fosfórica acidulada estuvo disponible para ser utilizada por las plantas durante casi todo el ciclo de vegetación.

Si se compara la aplicación anticipada al voleo con la aplicación en banda a la siembra (promedio de tratamientos hechos con roca en polvo y granulada) se puede observar que sólo en la última modalidad hay respuesta a la aplicación de roca fosfórica (Figura 1).

Una de las razones que podría explicar el por qué la roca fosfórica de Zimapán sin tratamiento ácido (31.8% de  $P_2O_5$ ) no indujo ninguna respuesta, es que posee sólo 5.3% de  $P_2O_5$  soluble en citrato de amonio y una relación  $CO_3:PO_4$  igual a 0.0699 que es muy baja. Esta última relación, que indica el grado de substitución de fosfato por el carbonato, está a su vez relacionada con la disponibilidad de fósforo para las plantas.

Cuadro 5. Efecto de la roca fosfórica de Zimapán, Hidalgo, sobre el rendimiento grano de maíz en tres suelos. (Arroyave et al., 1979).

Tratamientos*	Rendimiento en grano (t/ha)		
	El Capulín (Andosol)	Sta. Maria del Monte (Andosol)	San Juan (Mollisol)
Testigo absoluto	0.8	1.2	3.8
RF 0 ABP	0.8	4.1	--
RF 0 AVP	0.8	3.8	7.6
RF 25 AVP	0.7	4.2	7.4
RF 50 AVP	0.8	4.3	--
RF 75 AVP	0.8	4.6	--
RF 100 AVP	0.6	4.2	8.0
RF 0 SBP	0.6	3.9	7.8
RF 25 SBP	0.8	4.4	7.5
RF 50 SBP	1.7	4.6	--
RF 75 SBP	1.5	4.7	--
RF 100 SBP	1.6	3.8	7.6
RF 25 SBG	1.3	3.7	--
RF 50 SBG	1.3	4.6	--
RF 75 SBG	1.7	5.1	--
ST 20 SBG	0.8	4.2	--
ST 40 SBG	1.1	4.7	7.7
ST 60 SBG	1.3	4.9	8.0
ST 80 SBG	1.3	4.9	--
ST 90 SBG	--	--	7.3
ST 100 SBG	1.6	4.2	--
AMG $P_{2}O_{5}$ (Tukey)	0.7	1.3	1.4
C.V. (%)	24.9	11.8	8.0

\* RF 0, 25, 50, 75 y 100 = Roca fosfórica con 0, 25, 50, 75 y 100% de acidulación, aplicada en dosis de 90 kg de  $P_{2}O_{5}$ /ha en los sitios El Capulín y Sta. Maria del Monte y de 60 kg  $P_{2}O_{5}$ /ha en San Juan.

ST 20, 40, 60, 80, 90 y 100 = Dosis de  $P_{2}O_{5}$ /ha como superfosfato triple.

ABP = Aplicación anticipada en banda y material en polvo.

AVP = Aplicación anticipada en voleo y material en polvo.

SBP = Aplicación a la siembra en banda y material en polvo.

SBG = Aplicación a la siembra en banda y material granulado.

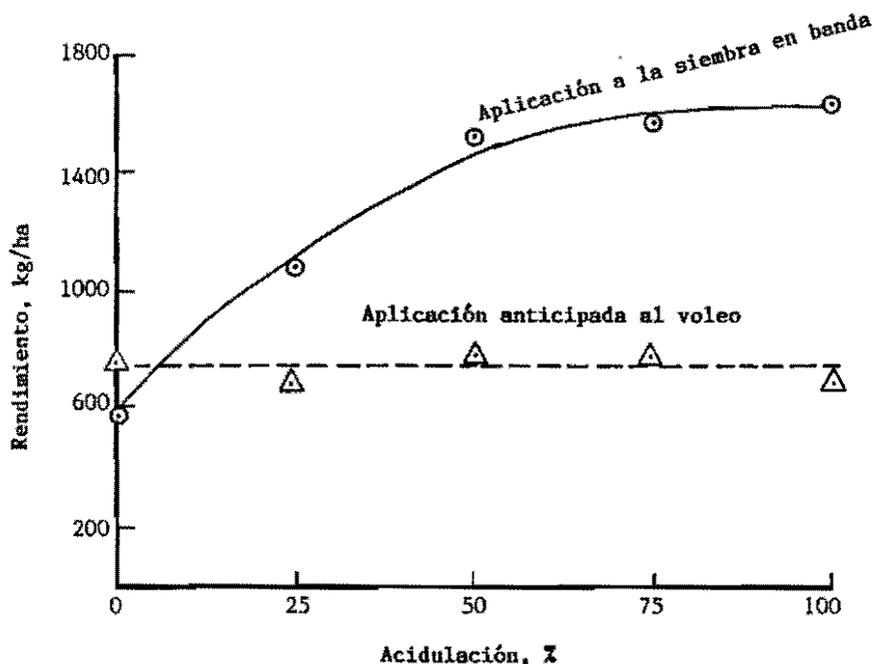


Figura 1. Efecto de la roca fosfórica de Zimapán acidulada en varios grados sobre el rendimiento de maíz en un Andosol (Estado de México) cuando se aplica antes de la siembra al voleo y a la siembra en banda (promedios de tratamientos con 80 kg/ha de  $P_2O_5$  como roca en polvo y granulada). (Arroyave et al., 1979; Núñez, 1979).

La mayor disponibilidad de fósforo de los tratamientos con roca acidulada, que se reflejó en los incrementos del rendimiento, no se manifestó claramente en los valores del análisis de fósforo según Bray-1. De aquí se puede deducir que los métodos tradicionales de extracción de fósforo no dan una buena indicación de este parámetro. El fenómeno mencionado ha sido destacado por otras investigaciones realizadas en esta área (Chien, 1978; Hammond, 1979) y requiere de mayor atención.

Alvarez, et al. (1981) realizaron un trabajo de invernadero en 2 suelos, un Andosol del estado de México de pH 5.5 y un Ultisol de Veracruz con pH 5.4, con el objeto de evaluar la eficiencia agronómica de las rocas fosfóricas de Zimapán, Hidalgo, (29.8%  $P_2O_5$ ) y de San Juan de la Costa, Baja California Sur (30.4%  $P_2O_5$ ) finamente molidas y aciduladas al 0, 25, 50, 75 y 100%, con ácido fosfórico. Como fertilizante de comparación se usó superfosfato triple en dosis crecientes de  $P_2O_5$  (0, 50, 100 y 150 ppm).

Tratamientos adicionales de roca fosfórica tratada con azufre y *Thiobacillus*, realizados con el objeto de incrementar su eficiencia, fueron establecidos en este experimento. Como planta indicadora se empleó ballico italiano (*Lolium multiflorum*). Para medir el rendimiento y la absorción de fósforo se hicieron tres cortes a intervalos de 50 días.

Los resultados obtenidos (Cuadro 6) muestran que existió una fuerte respuesta a la aplicación de fósforo. Los aumentos de materia seca cuando se aplicó la dosis máxima de fósforo, fueron de 140% y 239%, en el Andosol y en el Ultisol, respectivamente.

Cuadro 6. Efecto de dos rocas fosfóricas aplicadas a dos suelos sobre el rendimiento de materia seca y la absorción de fósforo por pasto ballico (Alvarez et al., 1981).

		S u e l o			
		Andosol		Ultisol	
Dosis (ppm)	Acidulación (%)	Rendimiento (g/maceta)	Absorción P (mg/maceta)	Rendimiento (g/maceta)	Absorción P (mg/maceta)
<u>Superfosfato triple</u>					
0	-	2.1	1.8	1.5	1.1
50	-	4.5	4.9	4.3	3.5
100	-	5.1	6.5	5.6	7.4
150	-	5.4	5.6	7.4	
<u>Roca de Zimapán, Hidalgo</u>					
150	0	2.5	2.3	3.4	2.5
150	25	5.2	5.7	4.7	4.6
150	50	4.9	5.8	5.2	5.7
150	75	5.1	6.1	5.5	6.5
150	100	5.2	6.7	4.5	8.3
<u>Roca de San Juan de la Costa, B.C.S.</u>					
150	0	4.4	4.2	4.8	4.7
150	25	5.0	6.2	4.9	5.3
150	50	5.0	6.5	5.5	7.3
150	75	5.0	6.4	5.4	6.5
150	100	5.0	6.5	5.5	8.1

La roca fosfórica de San Juan de la Costa, Baja California Sur, fue más eficiente que la de Zimapán, Hidalgo. Esto confirma las evaluaciones de laboratorio hechas por Boy (1978) y Adán et al. (1980) y está de acuerdo con las características químicas encontradas para esta roca por el último autor. En cambio, las dos rocas produjeron menos materia seca que el superfosfato triple, con dosis de 150 ppm de  $P_2O_5$ . La diferencia entre la roca de Zimapán y el superfosfato triple aplicado en igual dosis, fue significativa. Sin embargo, las rocas fosfóricas sin acidular aumentaron notablemente el rendimiento con respecto al testigo.

Se notó también que un 25% de acidulación de las rocas fosfóricas es suficiente para incrementar los rendimientos, los cuales fueron más altos en el Ultisol que en el Andosol. La eficiencia de la absorción de fósforo fue mayor en el Andosol tratado con roca de Zimapán acidulada al 25% y casi igualó a la obtenida con el superfosfato.

En la Figura 2 se presentan los rendimientos promedios de los tratamientos con acidulación. Aquí se observa que hubo un efecto favorable de la adición de azufre a la roca de Zimapán. La roca de San Juan de la Costa con y sin adición de azufre produjo rendimientos comparables y la inoculación con *Thiobacillus* no tuvo efecto sobre éstos, debido a la existencia de la bacteria en el suelo.

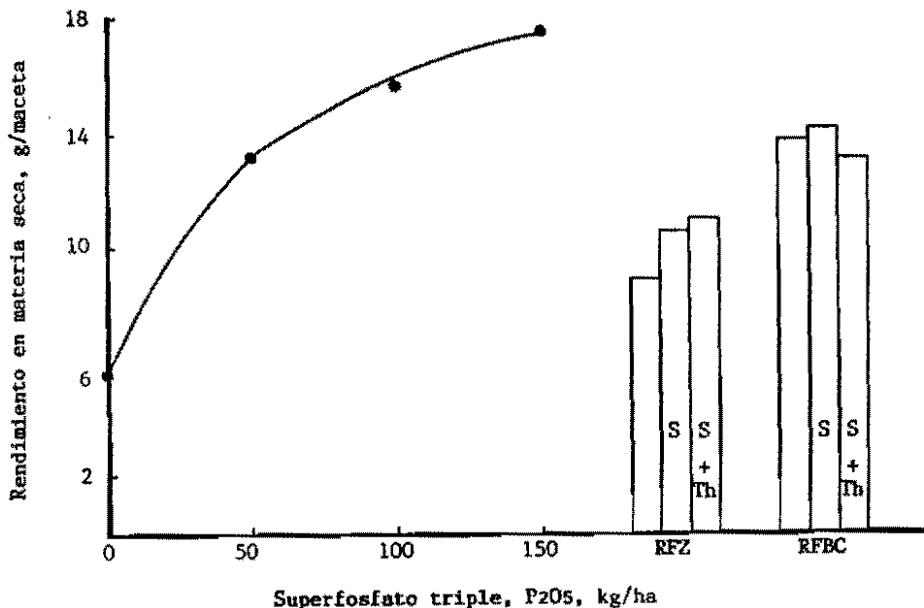
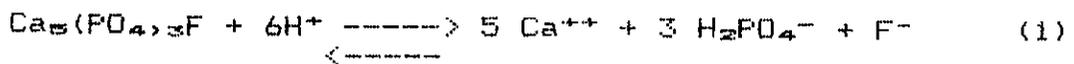


Figura 2. Efecto de la aplicación de roca fosfórica (150 pp2m) de Zimapán (RFZ) y Baja California (RFBC) sola y acidulada con azufre y con azufre más *Thiobacillus* sobre los rendimientos en materia seca, en relación la aplicación de Superfosfato triple. (Alvarez et al., 1981; Núñez, 1979).

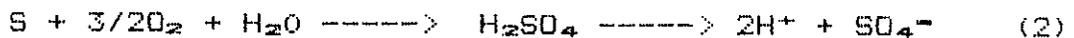
Un trabajo similar fue conducido en un Andosol del estado de Michoacán por Fernández, (1980) con roca fosfórica cruda de San Hilario, pero utilizando estiércoles de origen animal y composta de basura. Esta autora concluyó que los tratamientos con estiércoles de gallina y puerco (animales monogástricos) fueron superiores a los tratamientos con estiércoles de otros animales. Esta observación merece mayor atención puesto que en este trabajo no se da una buena explicación de el por qué de este comportamiento. A este respecto, Baus (1980), encontró que la adición de gallinaza a un Andosol disminuía la cantidad de aluminio extractable (aluminio ligado al humus, al alófono y a compuestos similares). Esto indicaría que el fósforo liberado por los fertilizantes fosfatados en los suelos tratados con gallinaza, tiene menos posibilidades de ser fijado y por lo tanto, sería más disponible para la planta.

### Enmiendas que Favorecen la Solubilización de la Roca Fosfórica en el Suelo

La solubilización de la apatita con la acidez del suelo ocurre como sigue:



La adición de azufre y/o de materia orgánica a la roca fosfórica proporciona su solubilización y son operaciones sencillas que el campesino puede realizar. El efecto solubilizador del azufre ocurre después de su oxidación microbiológica a sulfato, con la liberación de  $2\text{H}^+$ :



Por su parte, el efecto de la materia orgánica sobre la solubilización de la roca fosfórica proviene de su capacidad para inactivar al calcio liberado en la reacción 1, lo cual hace que dicha reacción reversible, fluya hacia la derecha. Debe asegurarse, sin embargo, que la materia orgánica utilizada sea rica en sitios funcionales y de estrecha relación carbono/nitrógeno. El estiércol porcino ha dado experimentalmente muy buenos resultados con este propósito.

### Experiencias con la Aplicación de Rocas Fosfóricas de Baja California

Desde principios de 1970 se realizaron algunos ensayos comparativos de la eficiencia agronómica de rocas fosfóricas importadas o procedentes de yacimientos del Norte o Centro de la República Mexicana. A partir de 1978, cuando se tuvieron disponibles muestras procedentes de Baja California, diversas instituciones las incluyeron en sus ensayos de campo, entre ellas Fertilizantes Mexicanos, S.A., el Instituto Nacional de Investigaciones Forestales y

Agropecuarios, El Colegio Superior de Agricultura Tropical y el Colegio de Postgraduados. El Cuadro 7 donde se compilan en forma resumida algunos de dichos trabajos, muestra los métodos experimentales, las características de los suelos y las rocas utilizadas y finalmente la eficiencia agronómica relativa (EAR) obtenida con dichas rocas, al compararse los rendimientos del cultivo o la extracción de fósforo por plantas fertilizadas con roca fosfórica, en relación con los rendimientos y extracciones de fósforo de plantas fertilizadas con superfosfato simple (SFS) o triple (SFT).

Antes de analizar los datos del Cuadro 7, conviene aclarar el método utilizado para la definición de la EAR. En su expresión más simple, EAR es el porcentaje de rendimiento o extracción de fósforo obtenido con roca fosfórica, considerando como 100% el logrado al fertilizar con la misma dosis de fósforo pero en forma de superfosfato simple o triple. Cuando las funciones de respuesta del cultivo a la fertilización fosfatada son lineales, el valor de la EAR en un ensayo dado es constante independientemente de la dosis utilizada y el requerimiento equivalente de fósforo como roca fosfórica es igual al recíproco de la EAR. Sin embargo, cuando dichas funciones son exponenciales, como normalmente ocurre por obedecer a la ley de los incrementos decrecientes del rendimiento, la EAR depende de la dosificación a la que se haga la comparación. En el presente estudio, con el objeto de evitar la dependencia que la EAR tiene con la dosificación, se utilizó un proceso de cálculo en el cual se consideraron todas las dosis probadas en cada ensayo, igualándose a 100% el área comprendida abajo de la curva de respuesta al superfosfato y expresando la EAR como el porcentaje de aquella área, ocupada por la integral de la respuesta a la roca fosfórica en estudio, como se ilustra en la Figura 3. Este procedimiento de cálculo en general reporta valores de EAR algo inferiores a los obtenidos al considerar solo puntos cercanos a la dosis óptima económica de fósforo como superfosfato, pero proporciona un dato más reproducible para comparación de diferentes ensayos y el valor obtenido es más conservador.

Los valores de E.A.R. reportados en el Cuadro 7 fueron obtenidos mediante este procedimiento de integración de funciones de respuesta, pero aplicando una solución gráfica en la que los rendimientos obtenidos o las cantidades de fósforo absorbido con cada dosis de fósforo aplicado, se unieron mediante líneas rectas.

En el Cuadro 7 se puede observar que en el ensayo de invernadero de Adán et. al. (1980), los valores de EAR obtenidos en el Ultisol de Veracruz fueron muy bajos para las cuatro rocas ensayadas; en cambio en el Andosol del Estado de México, tres de dichas rocas mostraron valores de EAR mayores del 38%. Mendoza (1980) en sus ensayos de campo

Cuadro 7. Eficiencia agronómica relativa (EAR) de rocas fosfóricas de Baja California bajo diferentes condiciones experimentales.

Condiciones experimentales y referencias	Descripción del suelo utilizado	Descripción de la Roca Fosfórica	E.A.R. <sup>a</sup> (%)
Invernadero	Ultisol	Rofomex cruda BCS SAC = 15.486; 23.82% P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> Fineza - 80 + 230 mallas	2.72
	Lealtad de Muñoz, Veracruz		
	pH = 5.4 P Bray 1 = 2.92 ppm.	San Hilario, BCS SAC = 13.484; 20.52 P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> Fineza - 80 + 230 mallas	18.98
Cultivo <u>Lolium multiflorum</u>		Comp. 2 Rofomex SAC = 10.885; 30.17% P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> Fineza - 80 + 230 mallas	6.20
	Cap. fijación P = 82.11%		
Dosis de 0, 100 y 200 kg/ha de P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Al activo = 3.25 meq/100 g.	San Juan de la Costa, BCS SAC = 13.185; 18.08% P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> Fineza - 80 + 230 mallas	5.18
Base P absorbido vs. SFT	Andosol Lomas de Juárez, México	Rofomex cruda BCS SAC = 15.486; 23.82% P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> Fineza - 80 + 230 mallas	2.71
en cuatro cortes	pH = 5.3 P Bray 1 = 0.63 ppm	San Hilario, BCS SAC = 13.484; 20.52% P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> Fineza - 80 + 230 mallas	50.85
Adán G, J.H.; J.L. Cajuste y R. Nuñez E. (1980)	Cap. fijación P = 99.37% Al activo = 2.36 meq/100 g	Comp. 2 Rofomex SAC = 10.885; 30.17% P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> Fineza - 80 + 230 mallas	45.77
		San Juan de la Costa, BCS SAC = 13.185; 18.08% P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> Fineza - 80 + 230 mallas.	38.50

(Continúa)

Cuadro 7. Eficiencia agronómica relativa (EAR) de rocas fosfóricas de Baja California bajo diferentes condiciones experimentales. (Continuación).

Condiciones experimentales y referencias	Descripción del suelo utilizado	Descripción de la Roca Fosfórica	E.A.R.* (%)
Campo	J. Rdquez. Clara, Veracruz	R.F. de San Hilario, BCS	50.00 <sup>a</sup>
Maíz de temporal	pH = 5.4; P Bray 1 = 11.5 ppm	20.72% P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> total	
Dosis 0, 40 y 80 kg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> /ha	Nopalapan, Veracruz pH = 4.0; P Bray 1 = 11.5 ppm	9.88% P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> soluble en ácido cítrico	23.52 <sup>a</sup>
Base rendimiento de grano vs. SFT	Ixtlahuacán del Rio, Jalisco pH = 4.9; P Bray 1 = 17.5 ppm	Fineza: 89.4% - 100 mallas	No respuesta a P
Mendoza T., J. (1980)	Arenal, Jalisco pH = 5.0; P Bray 1 = 11.5 ppm	60.3% - 325 mallas	82.31 <sup>a</sup>
Invernadero <u>Lolium multiflorum</u>	Andosol de V. de Allende, México	San Juan de la Costa, BCS	54.86
Dosis de 0 y 150 ppm P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	pH 5.5; P Bray 1 = 0.21 ppm	San Juan de la Costa BCS + 300 pp2m S	69.99
Base P absorbido vs. SFT en tres cortes	Ultisol de Novara, Veracruz	San Juan de la Costa, BCS	55.74
Alvarez et al. (1981)	pH = 5.4; P Bray 1 = 24.06 ppm	San Juan de la Costa, BCS + 300 pp2m S	81.54
Invernadero	Andosol ótrico Lomas de Juárez, México	R.F. de San Hilario, BCS	0
Cultivo <u>Lolium multiflorum</u>	pH = 5.8		
Dosis de 0 y 100 pp2m P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	P Bray 1 = 0.52 ppm	R.F. de San Hilario BCS + 300 pp2m S	54.74
Base P absorbido vs. SFT en 4 cortes	Andosol mólico Lomas de San Juan, México	R.F. de San Hilario, BCS	0
Guzman E., et al. (1980)	pH = 7.0 P Bray 1 = 24.48 ppm	R.F. de San Hilario, BCS + 300 pp2m S	112.18

(Continúa)

Cuadro 7. Eficiencia agronómica relativa (EAR) de rocas fosfóricas de Baja California bajo diferentes condiciones experimentales. (Continuación).

Condiciones experimentales y referencias	Descripción del suelo utilizado	Descripción de la Roca Fosfórica	E.A.R.* (%)
Invernadero	Ultisol	R.F. de San Juan de la Costa BCS concentrada al 30% $P_2O_5$	26.21
Cultivo yuca ( <i>Manihot esculenta</i> ) Dosis de 0, 50, 100 y 150 ppm de $P_2O_5$	Sabana Huimanguillo, Tab. pH = 4.5	R.F. de San Juan de la Costa BCS concentrada al 30% $P_2O_5$ + 25 y 50 ppm S	103.95
Base P absorbido vs. SFT	P Bray 1 = 2.00 ppm	R.F. de San Juan de la Costa BCS concentrada al 30% $P_2O_5$ + SFT + S	102.63
Sánchez M., J.H. (1986)		R.F. de San Juan de la Costa BCS concentrada al 30% $P_2O_5$ + S + micorriza	56.58
Campo Maíz de temporal	Andosol St. Clara, Mich. pH 5.5; P Bray 1 = 0.24 ppm	R.F. de San Hilario BCS con 20.6 % $P_2O_5$ total	50.91 <sup>b</sup>
Dosis 0, 40, 80, 120, 160 kg $P_2O_5$ /ha	Andosol Ejido Cungo, Mich. pH 5.8; P Bray 1 = 0.47 ppm	5.0% $P_2O_5$ citrato soluble Granulometría:	63.17 <sup>b</sup>
Base rendimiento grano vs. superfosfato simple	Andosol San Gregorio, Mich. pH 5.15; P Bray 1 = 0.51 ppm	9.6% + 100 mallas 28.3% - 100 + 325 mallas	58.57 <sup>b</sup>
Trinidad S., A. et al. (1984)	Alfisol Patambicho, Mich. pH 6.4; P Bray 1 = 0.34 ppm.	62.1% - 325 mallas	28.49 <sup>b</sup>
Campo Maíz de temporal	Andosol de Camébaro, Mich.	R.F. de Baja California 30.3% $P_2O_5$	52.60
Dosis 0 y 100 kg $P_2O_5$ /ha	pH 5.7; P Bray 1 = 9.0 ppm.	R.F. de Baja California 30.3% $P_2O_5$ + 40 kg S/ha	67.00
Base P absorbido vs. SFT		50% P como RFBC + 50% P como estiércol porcino	149.36
Núñez E., R. et al. (1986)		50% P como RFBC + 50% P como estiércol porcino + 40 kg S/ha	164.97

(Continúa)

Cuadro 7. Eficiencia agronómica relativa (EAR) de rocas fosfóricas de Baja California bajo diferentes condiciones experimentales. (Continuación).

Condiciones experimentales y referencias	Descripción del suelo utilizado	Descripción de la Roca Fosfórica	E.A.R.* (%)
Experimento de campo Asociación yuca ( <u>Manihot esculenta</u> ) y frijol pelón ( <u>Vigna unguiculata</u> )	Ultisol sabana Huimanguillo, Tabasco pH 4.6; P Bray I = 2.5 ppm.	R.F. de Baja California 19.92% P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> total 3.78% P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> citrato soluble Fineza - 100 + 200 mallas Dosis ensayadas: 0, 100, 200, 300 kg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> /ha	
Frijol pelón Base rendimiento 1a. cosecha vs. SFT			98.71
Frijol pelón Base rendimiento 2a. cosecha vs. SFT			131.84
Yuca Base rendimiento raíz fresca vs. SFT			95.94
Pastrana (1980)			
Experimento de campo			
Pasto Estrella de Africa ( <u>Cynodon plectostachvus</u> )	Ultisol sabana Huimanguillo, Tabasco	R.F. de Baja California 30.2% P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> total	59.71
Base P absorbido vs. SFT	pH 5.4; P Bray II = trazas	R.F. de Baja California 30.2% P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> total + Azufre	65.51
Pastrana et. al. (1983)		1.2 RFBC (30.2% P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> total) + 1/2 SFT	70.15
Invernadero Cultivo <u>Leucaena leucocephala</u>	Ultisol Sabana Huimanguillo, Tab.	R.F. de Baja California 30.3% P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> 4.0% P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> citrato soluble + <u>Rhizobium loti</u>	70.79
Dosis 0, 100, 200, 300 pp2m P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> base P absorbido vs SFT Velasco Z., M.E. (1986)	pH = 5.3 P Bray I = 2.1 ppm.	200 pp2m P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> RF de Baja California 30.3% P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> 4.0% P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> citrato soluble + N fertilizante	26.31

(Continua)

Cuadro 7. Eficiencia agronómica relativa (EAR) de rocas fosfóricas de Baja California bajo diferentes condiciones experimentales. (Continuación).

Condiciones experimentales y referencias	Descripción del suelo utilizado	Descripción de la Roca Fosfórica	E.A.R.* (%)
Campo Maíz de temporal	Andosol de Ejido Ajuno, Mich.	R.F. de Baja California con 30.3% P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> total	149.24
Dosis 0, 50, 100 kg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> /ha	pH 6.1; P Bray 1 = 2.0 ppm	R.F. de Baja California con 30.3% P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> total + 40 Kg S/ha	114.92
Base rendimiento grano vs SFT		50% P como RFBC + 50% P como estiércol porcino	216.58
Nuñez E., R. et al. (1987)		50% como RFBC + 50% P como estiércol porcino + 40 kg S/ha	210.62

$$* \text{ E.A.R. (\%)} = \frac{\text{P absorbido Trat. RF} - \text{P absorbido Testigo}}{\text{P absorbido Trat. SFT} - \text{P absorbido Testigo}} \times 100$$

<sup>b</sup> Cálculos con base en rendimientos de grano de maíz.

con maíz de temporal, (Cuadro 7) también encontró en Nopalapan, Veracruz, una EAR baja (23.5%); pero en Arrenal, Jalisco, dicho valor llegó a 82.3%. Varios ensayos de invernadero conducidos en Andosoles y Ultisoles usando como planta indicadora pasto italiano (*Lolium multiflorum*) (Alvarez et al., 1981; Guzmán et al., 1980) o yuca (*Manihot esculenta*) (Sánchez, 1986), reportaron consistentemente incrementos en la EAR al mezclar la roca fosfórica con flor de azufre (Cuadro 7). El caso extremo se observó con el Andosol mólico de Lomas de San Juan, México, en donde la roca fosfórica de San Hilario no aportó fósforo al cultivo cuando se aplicó sola, pero al adicionársele azufre, aportó 12% más fósforo que el superfosfato triple. También la yuca en el Ultisol de Huimanguillo rebasó al superfosfato triple en absorción de fósforo cuando la roca fosfórica de San Juan de la Costa fue complementada con azufre.

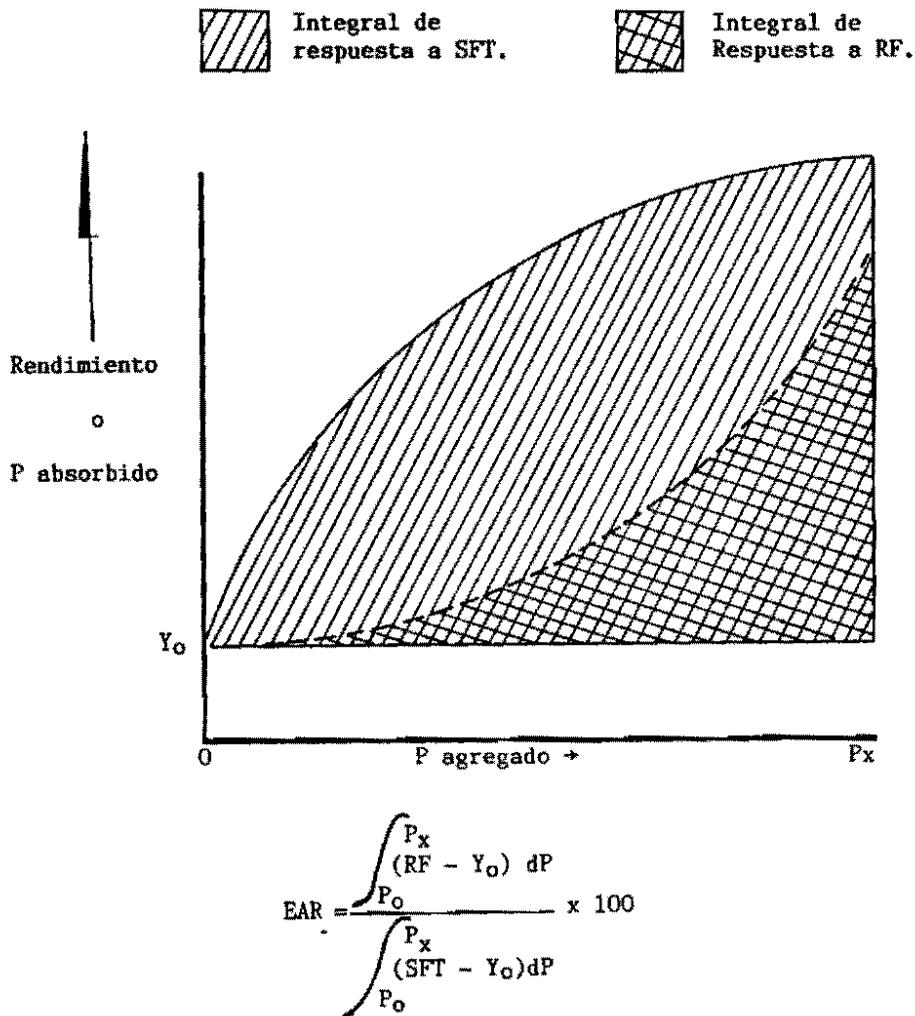


Figura 3. Expresión gráfica del cálculo de la Eficiencia Agronómica Relativa (EAR) de la roca fosfórica, mediante el método de la integración de las funciones de respuesta.

En experimentos de campo conducidos en la Sierra Tarasca, Trinidad et al. (1984) y Núñez et al. (1986), encontraron valores de EAR de la roca fosfórica que variaron de 50 a 63%, excepto en el Alfisol de Patambicho con pH 6.4, donde dicha EAR fue de solo 28% (Cuadro 7). La adición del 50% del fósforo en forma de estiércol porcino solo y adicionado con azufre, elevó los valores de la EAR a 149% y 165% respectivamente. Considerando que el estiércol porcino contenía 5.22% de  $P_2O_5$ , se requirió de 1.562 kg de estiércol húmedo (18.23% de humedad) por hectárea para abastecer 50 kg de  $P_2O_5$ /ha.

Pastrana (1980), trabajando con una asociación de yuca (Manihot esculenta) y frijol pelón (Vigna unguiculata) en la sabana de Huimanguillo, Tabasco, encontró una EAR de la roca fosfórica de Baja California, muy semejante a la del SFT (Cuadro 7) en la primer cosecha y un mayor efecto residual de la roca, reflejado en el valor de 131.84% de EAR en la segunda cosecha del frijol pelón. En la misma sabana de Huimanguillo, Pastrana et al. (1983) trabajando con pasto Estrella de Africa (Cynodon plectostachyus) encontraron una EAR de la roca fosfórica de Baja California (RFBC) equivalente a 59.7% de la obtenida con SFT, con ligeros incrementos al adicionar azufre o al aplicar una mezcla de RFBC + SFT (Cuadro 7).

En un ensayo invernadero con Leucaena leucocephala, (Velasco, 1986) desarrollado en un Ultisol de Tabasco, encontró un incremento en la EAR de 26 a 71% cuando sustituyó la fertilización nitrogenada por la inoculación con Rhizobium loti (Cuadro 7). Se considera que este incremento fue debido al efecto acidificante de Rhizobium en la rizosfera.

Finalmente, Núñez et al. (1987) en un ensayo de campo en la Sierra Tarasca, encontraron mayor respuesta del maíz de temporal a la roca fosfórica que al superfosfato, con un efecto estimulante del azufre y del estiércol sobre la absorción de fósforo.

### Análisis Económico

Aunque en general la roca fosfórica de Baja California presenta eficiencias agronómicas inferiores al superfosfato, la conveniencia de su uso por el agricultor depende del precio que debe pagar por su adquisición, en comparación con lo que paga por el superfosfato simple o triple. No es posible hacer un análisis económico mientras no se tenga roca fosfórica disponible para el agricultor y por lo tanto no exista un precio asignado para su venta directa. No obstante, en el Cuadro 8 se hace una comparación de precios de la roca fosfórica y del superfosfato triple según las cotizaciones FOB en dólares por tonelada métrica reportadas para la Costa del Golfo, E.U.A. en Agosto de 1987 (ADIFAL,

1987). En dicho Cuadro se puede observar que el precio del fósforo en la roca fosfórica es equivalente al 30.55% del precio del fósforo en el superfosfato triple. Dicho porcentaje sube al 40.04% al adicionarse 10% de azufre a la roca fosfórica. De tal suerte que en términos generales, con base en estos precios resultaría costeable para el agricultor el uso de roca fosfórica en sustitución de superfosfato triple, cuando la eficiencia agronómica relativa de la roca rebasa los porcentajes equivalentes de precios arriba señalados.

Cuadro B. Cálculo del precio equivalente del fósforo en la roca fosfórica sola o adicionada con azufre, en relación con el del superfosfato triple. Cotizaciones FOB en \$U.S. por tonelada métrica en la Costa del Golfo en Agosto de 1987. (ADIFAL, 1987).

Producto	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (%)	\$U.S./ t	\$U.S./ kg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Precio equivalente (%)
Superfosfato triple	46.00	145.00	0.3152	100.00
Roca fosfórica	31.15	30.00	0.0963	30.55
Roca fosfórica + 10% Azufre	28.32	35.73	0.1262	40.04
Azufre seco	--	93.00	--	--

### Conclusiones

La naturaleza misma de la roca fosfórica de Baja California y los resultados de los experimentos para la evaluación de su eficiencia agronómica relativa, ponen de manifiesto la posibilidad económica de sustituir a los superfosfatos con este material, siempre que se cumplan los siguientes requisitos:

1. Uso de roca fosfórica de Baja California concentrada al 30% de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> o de reactividad equivalente (S.A.C. superior a 9.4%).
2. Material molido a menos 100 mallas (U.S. Standard).
3. Aplicación a suelos con pH inferior a 6.0.
4. Precio del fósforo en la roca fosfórica equivalente a su EAR.

5. Conviene mezclar 10% de azufre a la roca fosfórica, para elevar su EAR y ampliar su ámbito de aplicación económica.
6. Conveniente agregar materia orgánica de fácil descomposición y estrecha relación C/N, para estimular la disolución de la roca fosfórica sin afectar la disponibilidad de nitrógeno.

La información experimental disponible, quizás sea todavía insuficiente para una generalización del uso de RFBC en suelos ácidos de México; pero las evidencias experimentales apoyan fuertemente la conveniencia de un programa masivo de parcelas demostrativas que familiaricen al campesino con el uso de este material y le permitan decidir en cada caso particular la factibilidad de su uso comercial. Para esto último es también necesario que la roca fosfórica de Baja California se ponga a la venta en las regiones de suelos ácidos de nuestro país, en la misma forma como se tienen disponibles los demás fertilizantes de alta reactividad.

## REFERENCIAS

- Adán G., J.H.; L.J. Cajuste y R. Núñez. 1980. Caracterización química mineralógica y evaluación agronómica de roca fosfórica. *Agrociencia (México)* 41:95-112.
- ADIFAL. 1987. Precios indicativos de los fertilizantes durante el mes de agosto de 1987. (Cotización FOB en Dls. por tonelada métrica) *Boletín ADIFAL* Vol. IX, No. 22:31.
- Alvarez E.; V. Núñez; L.J. Cajuste y R. Ferrera C. 1981. Eficiencia agronómica de rocas fosfóricas crudas y parcialmente aciduladas por métodos químicos y biológicos. *Agrociencia (México)* 45: 25-52.
- Arroyave A., J.; R. Núñez; S. Alcalde y L.J. Cajuste. 1979. Eficiencia de distintas técnicas de aplicación de roca fosfórica cruda y con diferentes grados de acidulación en maíz de temporal en la altiplanicie mexicana. *Agrociencia* 1979 (36):55-76.
- Baus P., J. 1980. Efecto de la fertilización orgánica e inorgánica sobre la dinámica del fósforo en un suelo de ando. Colegio de Postgraduados, Chapingo, México. (Tesis de Maestría).
- Boy, O.V.M. 1978. Evaluación de laboratorio de las rocas fosfóricas de Rofomex, S.A. y otros de consumo nacional, para aplicación directa al suelo. Fertilizantes Mexicanos, Gerencia de Planeación, México, D.F. (Documento mimeografiado A523/78/57).
- Cervantes S., J.J. 1987. Nuevos desarrollos de roca fosfórica en México. Congreso Internacional de Fertilizantes ADIFAL. México, D.F.
- Dirección General de Agrología. 1973. Unidades de suelos de la República Mexicana de acuerdo al Sistema FAO-UNESCO. Tercer intento. S.A.R.H.
- Etchevers, J.D.; R. Núñez E.; I. Montes G. y A. Trinidad S. 1986. Investigación agronómica con roca fosfórica en México. Serie Cuadernos de Edafología, Colegio de Postgraduados, Chapingo, México.
- Chien, S.H. 1978. Interpretation of Bray-1 extractable phosphorus from acid soil treated with phosphate rocks, *Soil Sci.* 126:34-39.
- Fernández P., L. 1980. Evaluación de invernadero de roca fosfórica de Baja California Sur mezclada con abonos orgánicos en suelos de ando de la Meseta Tarasca. Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ciencias Biológicas, México. (Tesis de Licenciatura).

- Gil, F., J. 1986. Fertility studies in volcanic soils of the Sierra Tarasca, México. Purdue University, Lafayette, Michigan. (Ph. D. Thesis).
- Guzmán E., C.; R. Núñez E. y A. Martínez G. 1980. Solubilización de dos rocas fosfóricas nacionales mediante mezclado con azufre, fertilizante nitrogenado y estiércol de bovino bajo fermentación aeróbica y anaeróbica. *Agrociencia (México)* 41:145-162.
- Hammond, L.L. 1979. Agronomic measurement of phosphate rock effectiveness, p. 147-173. In: Seminar on phosphate rock for direct application. International Fertilizer Development Center, Muscle Shoals, Alabama.
- Lehr, J.R. y G.H. McClellan. 1972. A revised laboratory reactivity scale for evaluating phosphate rocks for direct application. Tennessee Valley Authority Bulletin Y-43.
- Marval M., P.A. 1975. Eficiencia de roca fosfórica con diferentes grados de acidulación en relación a otros fertilizantes fosfatados en cuatro suelos, Colegio de Postgraduados, Chapingo, México. (Tesis de Maestría).
- Meléndez A., F.; A. Gohnzález y J. Pérez P. 1976. Evaluación de roca fosfórica y molibdeno para el establecimiento de Centrocema pubescens en suelos de sabana. *Agricultura Tropical* 1 (1): 64-72.
- Mendoza R., J. 1980. Evaluación agronómica de la roca fosfórica San Hilario, Baja California, en aplicación directa y su efecto residual con cultivo de maíz en algunos suelos de reacción ácida de los Edos. de Jalisco y Veracruz. Universidad Autónoma Chapingo, México. (Tesis de Licenciatura).
- Novoa, F.V. y R. Núñez E. 1974. Efficiency of five phosphate fertilizer sources in soil with different phosphate fixing capacities. *Tropic. Agric. (Trinidad)* 51:235-245.
- Núñez, E.R. 1979. Aumento de la eficiencia agronómica de roca fosfórica por métodos aplicables a nivel de finca. En: VI Congreso Latinoamericano de Fertilizantes, ADIFAL, Buenos Aires, Argentina.
- Núñez, E.R. 1984. Aplicación directa de rocas fosfóricas a suelos agrícolas en México. En: V. Ricaldi y S. Escalera (editores). *La Roca Fosfórica, Fertilizante directo de bajo costo. Tomo II (Aplicación Agrícola)* 269-294. GLIRF (Casilla 1983). Cochabamba, Bolivia.

- Núñez E., R.; A. Trinidad S.; J.R. Esparza y J.D. Etchevers. 1986. Eficiencia de roca fosfórica en maíz de temporal en un Andosol de México. 2º Seminario de Suelos de Ando. Pátzcuaro, Michoacán.
- Núñez E., R.; A. Trinidad S.; J.R. Esparza S.; F. Gavi R. y J.D. Etchevers B. 1987. Azufre y estiércol porcino como enmiendas a la roca fosfórica aplicada a maíz de temporal en un Andosol de México. Informe de Avances de Investigación. Colegio de Postgraduados, Chapingo, México.
- Pastrana A., L. 1980. Respuesta de la yuca a la aplicación de cal dolomita y fósforo. Informe de resultados en el área de suelos del Programa de Yuca. Ciclo 1977-1978. INIA, Campo Agrícola Experimental de Guimanguillo. Huimanguillo, Tabasco.
- Pastrana, A.L. y E. Illescas, M. 1980. Efecto de la acidulación de la roca fosfórica sobre el fósforo asimilable y rendimiento de forraje del pasto Estrella de Africa (Cynodon plectostachyus) en los suelos ácidos de la sabana de Huimanguillo, Tabasco. Agricultura Tropical, II(3): 213-218.
- Pastrana, A.L.; Sánchez M. y J. Pérez F. 1983. Evaluación de roca fosfórica Baja California con pasto Estrella de Africa (Cynodon plectosfachyus) en suelos Ultisoles. IX Reunión Asociación Latinoamericana de Producción Animal. Pontificia Universidad Católica de Chile. Santiago de Chile.
- Sánchez M., J.H. 1986. Aumento de la eficiencia de la roca fosfórica de Baja California mediante el uso de activadores químicos y biológicos. Tesis de Maestría en Ciencias. Colegio de Postgraduados, Chapingo, México.
- Trinidad S., A.; R. Núñez E. y J.D. Etchevers. 1984. Evaluación del uso de roca fosfórica en suelos de Ando. Informe de Avances de Investigación. Colegio de Postgraduados, Chapingo, México.
- Velasco Z., M.E. 1986. Manejo de fertilizantes e inoculación en el desarrollo y rendimiento de Leucaena leucocephala cv. peruano, en un suelo ácido. Tesis de Maestría en Ciencias. Colegio de Postgraduados, Chapingo, México.

## 5. EVALUACION DE LA EFICACIA DE ROCAS FOSFORICAS COMO FUENTES DE FOSFORO PARA LOS CULTIVOS EN SUELOS DE COSTA RICA

Gerardo F. Ramírez\*

### RESUMEN

Para evaluar la eficiencia de las rocas fosfóricas como fuentes de fósforo en aplicación directa, se condujeron en Costa Rica una serie de experimentos de campo en Utiisoles del norte y sur del país y en un Andisol del Valle Central Intermontano. La RFCN, la RFPA y el SFT mostraron una eficacia adecuada tanto en aplicación al voleo con incorporación antes de la siembra, como en aplicación al fondo de hoyos a un lado de las plantas a los 15 días de la siembra. Por el contrario, la RF tuvo una eficacia muy baja cuando se aplicó en hoyos, mientras que en la aplicación al voleo con incorporación, su eficacia fue satisfactoria aunque ligeramente más baja que las de la RFCN y RFPA. En relación con el SFT se encontraron las siguientes eficacias agronómicas: RF Gafsa, 87-89%; RFF, 76-92%; RFCN, 82-92% y RFFPA, 78-89%. En un experimento en el que se usó como fertilización fosfatada básica, en aplicación al voleo con incorporación, la RFF y RFCN en dosis de 75 kg P/ha, en combinación con la aplicación al fondo de hoyos a un lado de la planta 15 días después de la siembra, de RFCN y SFT en dosis de 0, 25, 50 y 75 kg P/ha, se encontró que el SFT tuvo una eficacia similar con ambas rocas fosfatadas, mientras que la eficacia de la RFCN, únicamente se acercó a la del SFT cuando se usó como base la misma RFCN, disminuyendo apreciablemente cuando se usó como base la RFF.

### Introducción

La baja disponibilidad de fósforo es uno de los factores en los suelos de los trópicos que representa un serio obstáculo para obtener rendimientos adecuados en las explotaciones agrícolas (Sánchez, 1976).

Dado al costo que han alcanzado los fertilizantes fosfatados convencionales, la búsqueda de fuentes de fósforo más baratas, como las rocas fosfóricas, constituye un campo de investigación interesante. Esto tiene especial relevancia en los países en desarrollo, con economías débiles, en los cuales es mayor la necesidad de un aumento de la producción y productividad agropecuaria.

---

\*Unidad de Suelos, Ministerio de Agricultura y Ganadería, San José, Costa Rica.

Desde hace mucho tiempo se han usado las rocas fosfóricas como fuentes directas de fósforo para los cultivos. Sin embargo, los resultados de los experimentos realizados en el pasado, para probar su eficacia como abonos fosfatados, han sido contradictorios debido a los conocimientos insuficientes de las propiedades físico-químicas de las distintas rocas y de los factores que influyen en su eficacia. Sin embargo, en las últimas décadas se han hecho notables progresos en este campo, de tal manera que ahora es posible hacer una mejor, y más segura aplicación de las rocas fosfóricas.

Aunque en general se ha encontrado que la eficacia de las rocas fosfóricas por unidad de fósforo aplicado es inferior a la del superfosfato, también existen numerosos ejemplos en la literatura de una eficacia similar.

Todavía falta por investigar el manejo agronómico de estos productos en función de su máximo efecto residual y por consiguiente en el mayor aprovechamiento del fósforo. Además, de los aspectos agronómicos, deben tomarse en cuenta otros factores como el transporte, el almacenamiento y la forma de aplicación que inciden en el costo final de estos productos.

Lo arriba expuesto deja ver la conveniencia de realizar investigaciones con rocas fosfóricas en países en vías de desarrollo, con el fin de determinar las condiciones inherentes al material fosfórico, al suelo, a la planta y al manejo, que permitan el mejor aprovechamiento de esos productos de una manera más económica que la de los fosfatos solubles. La búsqueda de fuentes de fósforo más baratas, debe realizarse al mismo tiempo que la investigación para la selección de cultivares tolerantes a condiciones de baja disponibilidad de este elemento en el suelo (León y Fenster, 1979; Sánchez, 1976).

La mayor parte de los yacimientos actuales de rocas fosfóricas tienen origen sedimentario. La apatita de esos sedimentos tienen una estructura cristalina fina (criptocristalina) y los cristales tienen un diámetro de  $10^{-7}$  a  $10^{-6}$  cm. La composición química de este tipo de apatita difiere de la fluorapatita y de la hidroxiapatita por la sustitución isomórfica del fosfato por carbonato y del calcio por sodio y magnesio. La solubilidad en ácidos orgánicos y la reactividad de la apatita aumenta con un incremento en la sustitución isomórfica citada. La solubilidad y liberación de fósforo de apatitas similares a la fluorapatita (rocas fosfóricas duras) son muy exiguas y en contraposición a las apatitas carbonatadas e hidroxiapatitas (rocas fosfóricas suaves) no son indicadas para la aplicación directa como abonos fosfatados.

### Localidades y materiales experimentales

Las investigaciones llevadas a cabo tenían los siguientes objetivos:

- a) Estudiar el comportamiento a largo plazo de las rocas fosfóricas como fuentes de fósforo tanto en su dinámica en el suelo como por la respuesta de los cultivos.
- b) Analizar desde el punto de vista económico la eficacia de las rocas fosfóricas, para considerar su posible uso en la fertilización de cultivos.

Se instalaron una serie de experimentos de campo en las siguientes localidades:

1. Santa Rita-Río Cuarto de Grecia, zona norte del país. Suelo clasificado como Typic Tropohumult.
2. Hacienda Juan Viñas, Cantón Jiménez de Cartago. Suelo clasificado como Andic Humitropept.
3. San Isidro-Pérez Zeledón. Suelo clasificado como Typic Tropohumult.

Las características químicas de estos suelos se detallan en el Cuadro 1.

Las fuentes evaluadas fueron: las rocas fosfóricas Gafsa, Carolina del Norte, Centro de Florida cruda y parcialmente acidulada y el Superfosfato triple. La composición química de las rocas se detalla en el Cuadro 2.

### Resultados

1. En Santa Rita-Río Cuarto de Grecia se instalaron varios ensayos:

- a) Evaluación de la roca fosfórica Gafsa (Túnez).
- b) Evaluación de las rocas fosfóricas Carolina del Norte, Florida y Roca fosfórica Florida parcialmente acidulada (RFFPA), materiales proporcionados por el IFDC.

A continuación se describen los resultados de ambos estudios.

#### **Evaluación de la roca fosfórica Gafsa**

El objetivo de este estudio era determinar la eficacia de la roca fosfórica Gafsa como fertilizante fosfatado en aplicación directa mezclada en varias cantidades con SFT. El estudio se efectuó en un suelo Ultisol del norte del país cuyas características químicas se muestran en el Cuadro 1.

Cuadro 1. Características químicas de los suelos donde se realizaron los experimentos.

	Santa Rita Rio Cuarto de Grecia	Juan Viñas	San Isidro- Pérez Zeledón
pH	4.7	5.1	5.4
P (Olsen) - ppm	2.0 <sup>a</sup>	1.0	4.0
Ca, meq/100 g de suelo	1.5 <sup>b</sup>	2.4	3.0
K, meq/100 g de suelo	0.3 <sup>a</sup>	0.1	0.3
Mg, meq/100 g de suelo	0.6 <sup>b</sup>	0.5	0.8
Al, meq/100 g de suelo	2.1 <sup>b</sup>	0.9	0.3
Fe, ppm	134.0 <sup>a</sup>	78.0	71.0
Mn, ppm	84.0 <sup>a</sup>	3.0	5.0
Cu, ppm	19.0 <sup>a</sup>	10.0	3.0
Zn, ppm	4.0 <sup>a</sup>	2.0	1.0

<sup>a</sup> P, K y elementos menores extraídos mediante solución Olsen modificada (0,5 N NaHCO<sub>3</sub>), 0,01 N EDTA).

<sup>b</sup> Ca, Mg y Al (acidez intercambiable) extraídos mediante solución 1 N KCl.

Cuadro 2. Composición química (%) de las rocas fosfóricas utilizadas en los experimentos.

Roca fosfórica	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> total	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> Sol.H <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> Sol.cit.am.	CaO	SiO <sub>2</sub>	F	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
Gafsa	28	---	12,2(46) <sup>a</sup>	47,0	3,1	2,8	1,1	---	0,3
Carolina del Norte <sup>b</sup>	30,2	---	7,2	50,0	2,4	3,4	0,4	6,2	0,5
Centro de Florida <sup>b</sup>	30,9	---	4,8	45,2	6,9	3,6	1,3	4,8	1,5
Centro de Florida <sup>c</sup> parcialmente acidulada (40% H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> )	24,6	8,0	3,4	37,4	---	2,7	---	---	---

<sup>a</sup> Número entre paréntesis, porcentaje soluble con respecto al contenido de P total.

<sup>b</sup> El 90% de las partículas con un diámetro menor de 0,147 mm (100 mallas)

<sup>c</sup> Gránulos con diámetros entre 3,327 mm y 1,168 (-6 + 14 mallas)

En un arreglo factorial se emplearon 0, 120, 240 y 480 kg  $P_2O_5$ /ha procedente del SFT, además se ensayó la aplicación de 3.0 t  $CaCO_3$ /ha con la roca fosfórica. La roca se aplicó al voleo solo una vez al inicio del experimento y el SFT se aplicó en el fondo del surco en cada siembra. En el Cuadro 3 se muestran los rendimientos de los tres cultivos (maíz, frijol común, maíz).

Cuadro 3. Rendimiento de los cultivos maíz, frijol, maíz en Santa Rita-Río Cuarto de Grecia con varias dosis de fósforo procedente de la roca fosfórica Gafsa y SFT y efecto de la roca más cal.

Dosis (kg $P_2O_5$ /ha)		Rendimiento (t/ha)			
RF Gafsa	SFT	Maíz	Frijol	Maíz	Total
0	0	0.3	0.2	0.2	0.7
0	40	2.9	0.9	3.4	7.2
0	80	3.3	1.0	3.3	7.6
0	120	3.9	0.9	3.2	8.0
120	0	2.7	0.5	1.8	5.0
120	40	3.5	1.2	4.5	9.2
120	80	4.0	1.3	4.0	9.3
120	120	4.4	1.3	3.9	9.6
240	0	3.6	0.8	2.8	7.2
240	40	4.0	1.6	4.7	10.3
240	80	4.3	1.4	4.4	10.1
240	120	4.5	1.4	4.1	10.0
480	0	3.8	1.4	4.1	9.3
480	40	4.2	1.2	3.5	8.9
480	80	4.4	1.4	4.4	10.2
480	120	4.3	1.3	4.3	9.9
0 + 3.0 t $CaCO_3$ /ha		3.4	0.7	2.0	6.1
120 + 3.0 t $CaCO_3$ /ha		4.6	1.3	3.7	9.6
240 + 3.0 t $CaCO_3$ /ha		4.6	1.5	4.1	10.2
480 + 3.0 t $CaCO_3$ /ha		4.4	1.3	4.0	9.7

Los mejores tratamientos fueron 240 kg  $P_2O_5$ /ha como roca fosfórica + cal y 240 kg  $P_2O_5$ /ha como roca fosfórica + 40 kg  $P_2O_5$  como superfosfato triple cada vez a la siembra. Sin embargo, desde el punto de vista económico los mejores tratamientos fueron 120 kg  $P_2O_5$ /ha como roca fosfórica + cal y 120 kg  $P_2O_5$ /ha como roca fosfórica + 40 kg  $P_2O_5$ /ha como superfosfato triple cada vez a la siembra. Dado que en la práctica las siembras sucesivas en un terreno no coinciden en el mismo surco, como es el caso de este trabajo, se infiere que el tratamiento óptimo corresponde a la aplicación de únicamente roca fosfórica al voleo en la dosis de 120 kg  $P_2O_5$ /ha junto a un encalado. Ambas aplicaciones deberían repetirse cada 3 años.

Evaluación de las rocas fosfóricas Carolina del Norte (RFCN), Florida (RFF) y Florida parcialmente acidulada (RFFPA) y el SFT

El experimento establecido en mayo de 1982, consistió en la prueba de 4 materiales fosforados en dosis de 100, 200 y 400 kg  $P_2O_5$ /ha, con un testigo común, o sea un total de 13 tratamientos repetidos 4 veces. Los materiales se aplicaron al voleo y luego se incorporaron manualmente en el suelo. Dos semanas antes se aplicó una dosis de 3 toneladas métricas de carbonato de calcio por hectárea en todo el terreno experimental con el fin de reducir la acidez. Como fertilización básica se aplicaron 100 kg N/ha como nitrato de amonio, 60 kg  $K_2O$ /ha como sulfato de potasio y 30 kg  $MgO$ /ha como sulfato de magnesio monohidratado (kieserita). Además, se aplicaron elementos menores al suelo, de tal manera que se garantizara una excelente nutrición para el maíz y que únicamente el fósforo fuera el elemento variable que interfiriera en el crecimiento del cultivo. En el Cuadro 4 se muestran los rendimientos obtenidos, éstos fueron bajos debido a una fuerte sequía. En general, no se encontraron diferencias significativas entre los materiales fosforados estudiados ni entre las diferentes dosis usadas. El tratamiento sin fósforo (testigo) no produjo cosecha alguna, mientras que la mayor producción se obtuvo con el superfosfato triple en la dosis de 400 kg de  $P_2O_5$ /ha. En comparación con el rendimiento obtenido con el superfosfato triple (100%), los rendimientos de las rocas fosfóricas Carolina del Norte, Florida finamente molida y Florida parcialmente acidulada fueron 92,92 y 84%, respectivamente. El hecho de que con excepción del SFT no se encontraran diferencias entre dosis a pesar de la extrema deficiencia de fósforo, es de atribuir también a las condiciones climáticas desfavorables de poca precipitación durante el ciclo del cultivo, que no permitieron una adecuada reacción de los materiales fosforados en el suelo y consecuentemente la liberación de fósforo para el posterior aprovechamiento por las plantas.

Cuadro 4. Rendimiento de dos cultivos de maíz en Santa Rita-Río Cuarto de Grecia a dos aplicaciones de RFCN, RFF, RFFPA y SFT en tres dosis.

Fuente	Dosis (kg $P_2O_5$ /ha)	Rendimiento		
		Primera aplicación		Segunda aplicación
		Primera cosecha	Efecto residual	
		(t/ha)	(g/10 plantas)	(t/ha)
RFCN	100	1.9	23.4*	2.6
	200	2.1	39.0	3.5
	400	2.3	44.3	3.7
RFF	100	2.0	24.1	2.8
	200	2.0	38.3	3.3
	400	2.3	45.3	3.7
RFFPA	100	1.9	27.2	2.7
	200	1.8	31.6	3.2
	400	2.1	40.2	4.0
SFT	100	2.1	31.8	3.2
	200	2.2	40.0	3.6
	400	2.5	54.5	4.2
Testigo	0	0	10.3	0.1

\* En materia seca promedio de cinco cortes.

En siembras de maíz que se efectuaron luego, se pudo constatar que en ninguna parcela, incluso en las correspondientes a las dosis más altas de superfosfato triple, existía suficiente fósforo disponible para que las plantas completaran su ciclo con la producción de grano,

sino que el crecimiento prácticamente se detenía a las 6 a 7 semanas de edad.

En el Cuadro 4 se muestra la producción promedio de 5 cosechas de materia seca correspondiente a 10 plantas de maíz entre 4 y 5 semanas de edad, obtenidas en los diferentes tratamientos. Se puede observar una clara respuesta a las dosis empleadas pero igualmente no se encontraron diferencias estadísticamente significativas entre los materiales fosforados.

En el año 1985 que se recibió más cantidad de los materiales fosforados por parte del IFDC, haciéndose una segunda aplicación el 12 de noviembre de 1985 con iguales dosis de las aplicadas en 1982. La variedad de maíz usada fue de nuevo Los Diamantes.

En el Cuadro 4 se presentan los rendimientos obtenidos. En este experimento sí se observó una clara respuesta a las dosis de fósforo con todos los materiales probados, aunque no hubo diferencias estadísticamente significativas entre ellos. En comparación con el rendimiento obtenido con el SFT, los rendimientos de RFCN, RFF y RFFPA fueron 89%, 90% y 90% respectivamente.

2. En la Hacienda Juan Viñas, Cantón Jiménez de Cartago en un suelo Andic Humitropept (Cuadro 2) se evaluó el efecto de las RFCN, RFF, RFFPA y SFT en la producción de caña y rendimiento de azúcar.

Los cuatro materiales se aplicaron en dosis de 100, 200 y 400 kg  $P_2O_5$ /ha con una fertilización básica general. Se cosechó a los 19 meses de edad el primer corte y a los 21 meses después se realizó el segundo corte. En el Cuadro 5 se muestran los resultados; se observa que el mejor tratamiento, desde el punto de vista económico, fue la roca de Florida finamente molida en la dosis de 100 kg/ha con un incremento de 17% respecto al testigo en la producción de azúcar. Las futuras cosechas o cortes darán una información más completa para evaluar con más elementos de juicio los materiales que se están probando.

3. En San Isidro-Pérez Zeledón. En el Cuadro 2 se muestran las principales características del suelo. Se trata de un Typic Tropohumult, de baja fertilidad en cuanto a bases se refiere y con problemas de zinc. No exhibe problemas de acidez por haberse encalado anteriormente en dos oportunidades con una cantidad total aproximada de 4 toneladas de carbonato de calcio por hectárea.

En este sitio se llevaron a cabo dos experimentos:

- a) Estudio de dosis y formas de aplicación de SFT, RFF, y RFFPA.

Cuadro 5. Efecto de cuatro materiales fosfatados en la producción de caña y rendimiento en azúcar en Juan Viñas.

Tratamiento		Producción caña		Producción azúcar	
Fuente	Dosis (kg $P_2O_5$ /ha)	t/ha	t/mes	t/ha	t/mes
Testigo	---	114,4	7,2	16,6	0,83
RFCN	100	171,2	8,4	19,2	0,96
RFCN	200	150,7	7,6	17,1	0,86
RFCN	400	166,0	8,4	17,8	0,90
RFF	100	169,8	8,5	19,5	0,98
RFF	200	172,5	8,7	20,1	1,01
RFF	400	161,0	8,1	17,4	0,88
RFFPA	100	163,9	8,2	17,4	0,86
RFFPA	200	165,7	8,3	18,1	0,91
RFFPA	400	185,7	9,3	20,6	1,04
SFT	100	162,2	8,2	18,3	0,90
SFT	200	165,2	8,3	19,3	0,97
SFT	400	157,9	7,9	18,0	0,89

b) Estudio de la fertilización basal (voleo e incorporación) con RFF y RFCN en combinación con la fertilización a la siembra en hoyos con SFT y RFCN en tres dosis.

A continuación se describen los resultados de ambos estudios.

a) En este experimento se evaluó en cultivos alternados frijol-maíz la aplicación de SFT, RFFPA en minigránulos y RFF finamente molida al voleo y en hoyos al lado de la plántula 15 días después de la siembra. Para los dos primeros cultivos se utilizaron las dosis de 50, 100 y 150 kg P/ha y para los dos últimos se redujeron estas dosis a la mitad.

En el Cuadro 6 se detallan los rendimientos de los cuatro cultivos. En la primera cosecha de frijol las fuentes que produjeron los mejores rendimientos fueron el SFT y la RFFPA tanto aplicadas al voleo como en hoyos. Cuando se comparan estas dos fuentes, la RFFPA produjo un rendimiento equivalente al 86 y 87% del rendimiento de SFT al voleo y en hoyos respectivamente. Al comparar la RFF con el SFF, ésta sólo produjo el equivalente al 70 y 34% del rendimiento del SFT al voleo y en hoyos respectivamente. La RFF es el material que presenta las mayores diferencias en el rendimiento en cuanto a la forma de aplicación ya que aplicada en hoyos sólo produce un 44% de lo obtenido aplicada al voleo.

Cuadro 6. Rendimiento de los cultivos frijo, maíz, frijol, maíz en San Isidro debido a la aplicación de SFT, RFFPA y RFF en tres dosis, al voleo y en hoyos.

Tratamiento		Rendimiento (t/ha)							
Fuente	Dosis (kg P/ha)	Frijol		Maíz		Frijol*		Maíz*	
		Voleo	Hoyos	Voleo	Hoyos	Voleo	Hoyos	Voleo	Hoyos
Testigo		0.2		1.0		0.2		0.3	
SFT	50	1.4	1.4	3.1	2.8	1.7	1.9	2.9	2.0
	100	1.8	1.6	3.4	3.3	1.8	1.8	3.3	3.0
	150	2.0	1.7	3.8	3.4	2.4	2.1	3.5	3.3
RFFPA	50	1.3	1.2	2.9	2.4	1.5	1.5	2.3	2.3
	100	1.4	1.3	3.5	2.6	1.7	1.6	3.3	2.8
	150	1.7	1.6	3.8	3.3	1.8	1.7	3.8	3.4
RFF	50	1.0	0.4	2.8	2.0	1.5	1.0	3.0	2.2
	100	1.1	0.5	3.4	2.7	1.6	1.4	2.9	2.4
	150	1.4	0.7	3.6	2.9	1.7	1.6	3.4	2.7

\* En estos ensayos se utilizaron la mitad de las dosis.

En la segunda siembra (maíz), todos los materiales tuvieron un comportamiento similar en las formas de aplicación. Comparadas con el SFT la RFFPA y la RFF produjeron 99 y 95, 88 y 80% en las dos formas de aplicación. Los tres

materiales produjeron aumentos en el rendimiento con el incremento en la dosis y todos superaron ampliamente al testigo.

En la tercera cosecha (frijol) solo el SFT aplicado al voleo incrementó el rendimiento con el aumento de la dosis, mientras que los otros materiales produjeron aumentos muy ligeros. No se encontró mucha diferencia entre las dos formas de aplicación. Aplicadas al voleo la RFFPA y la RFF produjeron 85 y 83% con respecto al SFT respectivamente, mientras que aplicadas en hoyos produjeron 82 y 69%.

En la cuarta cosecha (maíz) no hubo diferencias entre las tres fuentes cuando se aplicaron al voleo, este sistema superó ampliamente con todas las fuentes y dosis, al sistema de aplicación en hoyos.

Al comparar las fuentes aplicadas en hoyos se encontró que el SFT y la RFFPA produjeron rendimientos significativamente superiores a los de la RFF.

Los resultados obtenidos indican que con excepción de la roca fosfórica finamente molida, no se han encontrado grandes diferencias entre los dos sistemas de aplicación: al voleo con incorporación y a espeque. Si se considera el costo extra de aplicar los fertilizantes fosforados al voleo con incorporación, por el laboreo del suelo para lograr una incorporación uniforme, posiblemente resulte más rentable hacer la aplicación en hoyos (a espeque) en el caso de superfosfato triple y la roca fosfórica de Florida parcialmente acidulada.

En el caso de la roca de Florida finamente molida, necesariamente la aplicación debe hacerse al voleo con incorporación, para obtener una eficacia satisfactoria de esta fuente fosfatada.

b) En este experimento se evaluó en cultivos alternados, frijol-maíz, la aplicación basal al voleo incorporada de RFF y RFCN a una dosis de 75 kg P/ha y la fertilización a la siembra en hoyos con SFT y RFCN en dosis de 25, 50 y 75 kg P/ha.

En el Cuadro 7 se reportan los resultados.

En la primera cosecha con frijol, la aplicación basal (testigo a) de la RFCN produjo 54% más que la RFF en la misma forma; cuando se comparan estas fuentes con la adición de fertilizante a la siembra no hay diferencia significativa entre ellos, pero en la segunda cosecha (maíz) la RFCN en aplicación basal superó a la RFF en todas las formas, especialmente cuando no hubo fertilización a la siembra.

Cuadro 7. Rendimientos (t/ha) de frijol y maíz en San Isidro en respuesta a la aplicación de RFF y RFCN al voleo y SFT y RFCN en hoyos a la siembra.

Fertilización a la siembra en hoyos		Fertilización al voleo incorporada			
Fuente	Dosis (kg P/ha)	Frijol		Maíz	
		RFF	RFCN	RFF	RFCN
Testigo a	0	1.1	1.7	1.8	2.8
SFT	25	1.8	1.8	2.5	3.0
SFT	50	2.0	1.9	3.2	3.3
SFT	75	2.0	2.0	3.1	3.5
RFCN	25	1.3	1.7	2.9	3.4
RFCN	50	1.3	1.8	3.0	3.6
RFCN	75	1.6	1.7	3.2	3.5
Testigo b	0	0.3		0.3	

Testigo a = Recibió fertilización basal.

Testigo b = No recibió fertilización.

En cuanto a la fertilización a la siembra en hoyos el SFT produjo mejores rendimientos que la RFCN solamente cuando se aplicó al frijol junto con RFF al voleo. En cuanto a las dosis de SFT y RFCN, solo se encontró respuesta del maíz al incremento hasta 50 kg P/ha.

### Discusión

El buen efecto obtenido con la roca fosfórica Gafsa está ampliamente corroborado en la literatura, lo mismo que el de la roca fosfórica Carolina del Norte. Igualmente es reconocida la mediana reactividad de la roca fosfórica del Centro de Florida. Merece especial atención el excelente comportamiento agronómico mostrado por la RF parcialmente acidulada en el experimento a en San Isidro de Pérez Zeledón, que anduvo cerca de la eficacia del superfosfato triple. En la primera cosecha de frijol incluso, en la aplicación en hoyos, su eficacia comparativa con SFT fue de 87%. Si se toman en cuenta las 4 cosechas y ambos tipos de aplicación la eficacia arriba citada alcanza 89%.

El efecto residual de los fertilizantes fosfatados debe determinarse durante largos períodos para una evaluación adecuada, lo cual se ha hecho limitadamente en los experimentos descritos, sin embargo, existen suficientes ejemplos indicativos de un efecto residual considerable de las rocas fosfóricas.

Existen algunos factores que afectan la eficacia de las rocas fosfóricas que deben estudiarse más profundamente, como por ejemplo dosis y épocas de aplicación de la cal. El comportamiento diferencial de las rocas fosfóricas Florida, Carolina del Norte y RF parcialmente acidulada en un mismo tipo de suelo (Tropohumult) y en condiciones climáticas muy similares se debe atribuir al encalado, pues mientras que Santa Rita-Río Cuarto de Grecia se encaló todo el terreno al mismo momento de la aplicación de los materiales fosfatados, en la localidad de Pérez Zeledón se hizo con suficiente antelación y en este último caso no interfirió con la reacción de los materiales en experimentación.

### **Conclusiones**

Los resultados de la investigación obtenidos hasta el momento sobre la eficacia de materiales fosfatados, indican el satisfactorio comportamiento de las rocas fosfóricas en estos suelos ácidos pobres en fósforo y de baja fertilidad. Además, estos estudios están permitiendo determinar en forma cuantitativa y sistemática el efecto residual de fertilizantes fosfatados en condiciones de campo a largo plazo, condiciones en que son escasos los datos precisos, sobre todo en suelos de los trópicos.

Todos estos conocimientos serán de gran utilidad a la hora de establecer los programas de fertilización de los diferentes cultivos.

Por otra parte, teniendo en cuenta que la fertilización fosfatada es un factor primordial en el aumento de la productividad de suelos ácidos y de baja fertilidad, el uso de fuentes más baratas de fósforo como las rocas fosfóricas contribuirá a disminuir los costos de producción.

Para asegurar la eficacia de las rocas fosfóricas debe realizarse un encalado moderado y aplicación de cantidades adecuadas de nitrógeno, potasio, magnesio y elementos menores.

Toda esta inversión en el rubro fertilización es altamente rentable, pues esos suelos ácidos poseen excelentes propiedades físicas, además que están distribuidos, por lo general, en zonas con regímenes de lluvia que garantizan la producción agrícola durante gran parte del año.

## REFERENCIAS

- Amberger, A. 1978. Experiences with soft rock phosphates for direct application. *In* Seminar on phosphate rock for direct application. Haifa, Israel, marzo 20-23, International Fertilizer Development Center, Muscle Shoals, Alabama, pp. 349-366.
- Anderson, D.L.; Kussow, W.R. and Corey, R.B. 1985. Phosphate rock dissolution in soil indications from plant growth studies. *Soil Science Society of America Journal* 49(4):918-925.
- Awasthi, P.K.; Luthra, K.L. and Jaggi, T.N. 1977. Use of Indian rock phosphate for direct application as phosphatic fertilizer. *Fertilizer News* 22(12):44-55.
- Barnes, J.S. and Kamprath, E.J. 1975. Availability of North Carolina rock phosphate applied to soils. North Carolina Agricultural Experiment Station. Technical Bulletin No. 229. 23 p.
- Cabala-Rosand, P. and Wild, A. 1982. Direct use of low grade phosphate rock from Brazil as fertilizer. 1. Effect of reaction time in soil. *Plant and Soil* 65(3):351-362.
- Chien, S.H. and Hammond, L.L. 1978. A comparison of various laboratory methods for predicting the agronomic potential of phosphate rocks for direct application. *Soil Science Society of America Journal* 42(6): 935-939.
- Chu, C.R.; Moschler, W.W. and Thomas G.W. 1962. Rock phosphate transformation in acid soils. *Soil Science Society of America Proceedings* 26(5):476-478.
- Cooke, B.W. 1978. Experimental work in the United Kingdom on the agricultural value of rock phosphate. *In* Seminar on phosphate rock for direct application. Haifa, Israel, March 20-23, 1978. International Fertilizer Development Center, Muscle Shoals, Alabama, pp. 304-324.
- Cordeiro, D.S. *et. al.* 1979. Efeito de niveis e fontes de fósforo na producao e no rendimento economico da soja na regio de Dourados (M.S.) *Revista Brasileira de Ciencia do Solo* 3:100-105.
- Davies, G.R. 1984. Comparison of water-insoluble phosphate fertilizers with superphosphate. A review *Journal of the Science of Food and Agriculture* 35(3):265-271.
- Fassbender, H.W. 1967. Los fosfatos naturales de Sechura, Perú. *Turrialba* 17(2):159-164.

- Fenster, W.E. and León L.A. 1978. Utilization of phosphate rock in tropical soils of Latin America. A research proposal. In Seminar on phosphate rock for direct application. Haifa, Israel, March 20-23. International Fertilizer Development Center, Muscle Shoals, Alabama, pp. 174-210.
- Goedert, W.J. y Lobato, E. 1980. Eficiencia agronomica de fosfatos em solo de cerrado. *Pesquisa Agropecuaria Brasileira* 15(3):311-318.
- Hammond, L.L. 1978. Agronomic measurements of phosphate rock effectiveness. In Seminar on phosphate rock for direct application. Haifa, Israel, March 20-23. International Fertilizer Development Center. Muscle Shoals, Alabama, pp. 147-173.
- Lehr, J.R. and McClellan, G.H. 1972. A revised laboratory reactivity scale for evaluating phosphate rocks for direct application. National Fertilizer Development Center - Tennessee Valley Authority, Muscle Shoals, Alabama. Bulletin Y-43. 36 p.
- León, L.A. and Fenster, W.E. 1979. Management of phosphorus in the Andean countries of tropical Latin America. *Phosphorus in agriculture* 76:57-73. The importance of phosphorus in a balanced fertilization. Proceeding of the ISMA Symposium. Mohammedia, Morocco, March 13-14.
- León, L.A. y Fenster, W.E. 1980. El uso de rocas fosfóricas como fuente de fósforo en suelos ácidos e infértiles de Sur América. Centro Internacional para el Desarrollo de Fertilizantes. Centro Internacional de Agricultura Tropical. VII Congreso Latinoamericano de la Ciencia del Suelo, Heredia, Costa Rica, junio 30 a julio 4. 24 p. Mimeo.
- Lobato, E. and Sanzonowicz, C. 1980. Effects of P sources on pastures. Research at the Jurimaguas Experiment Station in the Amazon jungle of Peru. In Agronomic-economic research on soils of the Tropics Report for 1978-1979. Soil Science Department. North Carolina State, Raleigh, N.C., pp. 51-61.
- Mokwunye, U. 1979. Phosphorus fertilizer in Nigerian savanna soils. II. Evaluation of three phosphate sources applied to maize at Samuru. *Tropical Agriculture (Trinidad)* 56(1):65-68.
- Motsara, M.R. and Datta, N.P. 1971. Rock phosphate as a fertilizer for direct application in acid soils. *Journal of the Indian Society of Soil Science* 19(1):107-113.

- Raij, B. Van and Diest, A., Van. 1980. Phosphate supplying power of rock phosphates in an Oxisol. *Plant and Soil* 55(1):97-104.
- Ramírez, G. 1980. Uso de rocas fosfóricas como fuente de fósforo en algunos suelos ácidos de Costa Rica. *Agronomía Costarricense* 4(1):33-39.
- Oliveira, E.L., de, et. al. 1984. Avaliação da eficiência agronomica de fosfatos naturais. *Revista Brasileira de Ciencia do Solo* 8(1):63-67.
- Sánchez, P.A. 1976. Properties and management of soils in the tropics. New York, Wiley, 618 p.
- Shinde, B.N.; Sarangamath, P.A. and Patnaik, S. 1978. Phosphorus transformation from rock phosphates in acid soils and measures for increasing their efficiency for growing rice (Oryza sativa). *Plant and Soil* 49(3):449-459.
- Yost, R.S. et. al. 1976. Residual effects of phosphorus application. Phosphorus sources on pastures Research at Brasília Experiment Station in the campo cerrado of Brazil. In Agronomic-economic research on tropical soils. Annual report for 1975. Soil Science Department, North Carolina State University, Raleigh, N.C., pp. 26-33.

## 6. EVALUACION AGRONOMICA DE LA ROCA FOSFORICA "CAPINOTA" EN LA ZONA ANDINA DE BOLIVIA

Raul Rico<sup>a</sup>  
 Franz Augstburger<sup>b</sup>  
 Juan Bellot<sup>c</sup>  
 Jorge Villarroel<sup>c</sup>

### RESUMEN

Con RF Capinota se realizaron ensayos en parcelas de pequeños agricultores de la zona andina de Bolivia en 2 etapas, la primera entre 2600 y 3500 msnm en suelos ligeramente ácidos y bajos en P con RF cruda donde el primer cultivo fue papa y los efectos residuales se evaluaron con cereales. La segunda etapa se realizó en suelos ligeramente alcalinos, moderados en P en el Valle entre 2400 y 2600 msnm con RFFA al 25 y 50% y con RF Bayovar. En los 16 ensayos de la primera etapa se encontró una reactividad muy baja de la RF cruda y una tendencia a interacción positiva con S; ni la respuesta del primer cultivo (papa) ni el efecto residual en cereales pueden satisfacer las expectativas agronómicas o económicas en la RF cruda. En la segunda etapa (8 ensayos) la eficiencia de las RFFA y RF Bayovar en el cultivo de maíz fue insuficiente; en papa y trigo sin embargo, se encontró una respuesta positiva.

### Introducción

Las principales limitaciones de la producción agrícola en la zona andina son el clima y la topografía. Muchos suelos además tienen limitaciones de tipo físico y/o químico donde el principal elemento nutritivo limitante es el fósforo. El agricultor de la zona andina usa como fuente más importante de elementos nutritivos para las plantas el estiércol, ya sea de la propia granja o de la industria avícola local.

Con una adecuada rotación de cultivos y la correcta utilización de abonos orgánicos, el campesino andino logra abastecer sus cultivos de manera parcial, tan solo amortiguando deficiencias importantes principalmente de P,

-----  
<sup>a</sup>Vice-Rector de la Universidad Mayor de San Simón, UMSS.

<sup>b</sup>Asesor del Proyecto Agrobiología Universidad Cochabamba, AGRUCO, Cochabamba, Bolivia.

<sup>c</sup>Investigadores del Proyecto AGRUCO.

debido al bajo contenido de este elemento en los suelos y también en los estiércoles (Augstburger, 1983). En la zona andina es conocida la alta correlación entre P y los rendimientos de papa, (Wangh et al, 1973). No en vano el campesino destina aproximadamente 90% de los abonos y fertilizantes a este cultivo.

La importación creciente de los fertilizantes tiene un efecto negativo en la ya pobre economía del país. Si bien gran parte de estos son aplicados en la producción industrial en el oriente, también en la producción del campesino andino, aumenta permanentemente el uso de los fertilizantes importados.

En Bolivia existen varios yacimientos de roca fosfórica (González, 1984). El de "Capinota" es considerado como el más importante, y es donde la Universidad Mayor de San Simón tiene la concesión de explotación de una parte del mismo.

La evaluación agronómica de la roca fosfórica (RF) Capinota viene realizándose en diferentes etapas experimentales. La primera se inició a partir de 1982 utilizando RF cruda en macetas.

La segunda con la misma roca en ensayos de campo en estaciones experimentales.

La tercera consistió en la comprobación de la primera y segunda etapa en parcelas de campesinos.

La cuarta cuenta con apoyo del IFDC, y utiliza roca parcialmente acidulada en parcelas de campesinos.

En la quinta se experimenta con mezcla de RF y agentes acidificantes, también en parcelas de estaciones experimentales y de campesinos.

Finalmente en la sexta fase se investiga el efecto de la fermentación de abonos orgánicos sobre la reactividad de la RF.

## Materiales y Métodos

### **Rocas Fosfóricas y Otros Fertilizantes**

En todos los ensayos se utilizó la RF que pertenece al yacimiento "Capinota", concretamente la de dos afloramientos: a) RF UMSS, afloramiento que corresponde a la concesión minera de la Universidad Mayor de San Simón, y b) RF Porro, producto que comercializa la Empresa Minera "Porro".

Bajo el término roca fosfórica cruda se entiende el producto triturado y molido a 100 mallas (RFC).

La roca fosfórica parcialmente acidulada ha sido procesada en el IFDC, (Alabama, USA) bajo la metodología existente para este fin (IFDC, 1986). Se utilizó roca fosfórica Capinota acidulada al 25% (RFPA25) y al 50% (RFPA50).

La roca fosfórica Bayovar (RFB) proviene del yacimiento "Bayovar" en Piura Perú.

El azufre sublimado (aproximadamente 99% S) proviene de yacimientos en el Departamento de Oruro de la empresa "Clavijo".

Superfosfato triple (SFT), Sulfato de amonio (SA) y Urea (U) fueron adquiridos en el mercado local.

### **Ensayo en Macetas**

El ensayo se realizó en la localidad de Pairumani, con suelo de la Estación Experimental de Toralapa en macetas con 8.5 kg de tierra expuesta a la intemperie. En los Cuadros 1 y 2 se dan los detalles del clima del lugar y las propiedades físicas y químicas del suelo.

Todos los fertilizantes se aplicaron antes de la siembra de haba como primer cultivo. Los dos últimos cultivos (maíz y trigo) no recibieron ninguna fertilización y reflejan el efecto residual.

### **Ensayos en Estaciones Experimentales y Parcelas de Campesinos**

La aplicación de los fertilizantes se realizó únicamente en el primer cultivo (papa), los cultivos siguientes (maíz y trigo) corresponden al efecto residual.

Como diseño se utilizó el de bloques al azar con 4 repeticiones, tanto en las estaciones experimentales, como en las parcelas de los campesinos.

Estas parcelas estaban ubicadas entre 2600 y 3790 msnm, con temperaturas medias anuales entre 6.0 y 15.0 °C. El pH del suelo fluctuaba entre 4.7 y 6.4 y el contenido de P asimilable (Olsen modificado) se registró entre 4.0 y 37 ppm (Cuadros 1 y 2).

En el caso del cultivo de papa se sembraron parcelas con 4 surcos de 10 m de largo, cosechando los 2 surcos centrales. Se utilizaron diferentes variedades locales de papa.

En el cultivo de maíz se utilizó el mismo tamaño de parcelas. Por distintas razones, algunos ensayos de maíz se cosecharon como maíz en ensilaje y el resultado fue expresado en materia seca.

Cuadro 1. Clima y propiedades físicas de los suelos de algunos sitios experimentales.

Sitios	Altitud (msnm)	Temperatura media anual	Precip. anual (mm)	Suelo			
				Textura	Arena (%)	Limo (%)	Arcilla (%)
Pairumani	2600	15.0	840	FL	23	56	21
Colomi	3210	12.6	666	FYL	10	56	34
Toralapa	3460	8.0	558	FL	23	55	22
Violeta	2680	16.1	588	FL	24	51	25
Tamborada	2560	18.0	518	FY	27	42	31
Pirque	2460	17.5	580	FL	25	56	19
Parotani	2450	17.3	580	F-FL	47	40	13
Apote	2700	16.1	590	FL	19	55	26

Cuadro 2. Propiedades químicas de los suelos de algunos sitios.

	pH (H <sub>2</sub> O) 1:5	M.O. (%)	P Olsen mod. (ppm)	C.E. (mhos/cm)	Cationes intercambiables (meq/100 g suelo)				
					Ca <sup>++</sup>	Mg <sup>++</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	CIC
Pairumani	6.4	5.3	.6	0.062	6.2	1.1	0.05	0.40	9.24
Colomi	5.4	5.1	25	0.120	10.8	1.6	0.27	0.41	14.50
Toralapa	5.7	1.7	9	0.070	2.5	0.5	0.25	0.24	4.23
Violeta	6.0	1.9	4*	0.864	1.02	3.6	3.1	0.2	-
Tamborada	6.2	1.7	40	0.147	5.0	3.0	0.9	1.3	10.8
Pirque	6.0	0.9	6	0.119	5.0	5.0	0.3	0.2	-
Parotani	6.2	0.7	30	0.457	16	18	10	1.64	-
Apote	7.9	2.1	3	0.693	-	-	-	-	-

(\*) Peach

En el cultivo de trigo se sembraron parcelas de 6 x 2 m con densidad de 120 kg/ha.

El efecto residual en todos los ensayos de campo correspondió a un laboreo post-cosecha y re-siembra con gramíneas sin aplicación de ningún tipo de fertilizante.

### **Ensayos con Abonos Orgánicos**

Los ensayos se ubicaron en las estaciones experimentales de Toralapa y Colomi. Se utilizó la metodología indicada anteriormente. Los abonos orgánicos aplicados consistieron en compost de desechos vegetales (CDV) y compost de basuras urbanas (CBU).

La RF fue añadida en un 20% respecto a la materia seca del material orgánico a fermentar. En el Tratamiento "CDV + RF", antes de la fermentación y "CBU + RF" sin fermentar indica la mezcla de RFB con compost de basuras urbanas al momento de la siembra del ensayo.

En otros ensayos se elaboró compost a partir de basuras urbanas (CBU) y estiércol bovino (CEB). Las pilas fueron hechas con 1000 kg de material orgánico seco y 20% de RF, 0.2% y 2% de S.

Las macetas contenían 8.5 kg de suelos de Toralapa y Tamborada expuestos a la intemperie. Como indicador se utilizó trébol alejandrino Trifolium alejandrinum y maíz.

El ensayo en microparcelas (2 m<sup>2</sup>/parcela) se realizó en la localidad de Apotes. El cultivo fue Trébol Alejandrino y los resultados corresponden a la suma de 3 cortes. En los Cuadros 1 y 2 se muestran las condiciones climáticas de la localidad y las propiedades físicas y químicas de los suelos.

## **Resultados y Discusión**

### **Primera Fase: Ensayos en Macetas**

Rodríguez (1981) utilizando RF de Capinota cruda en un Oxisol, en Cali, Colombia, encontró una reactividad media. En los ensayos en Bolivia en un Inceptisol, la RF no mostró respuesta positiva con ninguno de los tres cultivos (Cuadro 3). En combinación con N existió una tendencia de respuesta al P de la haba, pero no en los cultivos siguientes.

### **Segunda Fase: Ensayos en Estaciones Experimentales**

El Cuadro 4, muestra los resultados obtenidos en las estaciones experimentales de Pairumani (bajo riego) y Toralapa (en seco).

Cuadro 3. Rendimiento en materia seca (g/maceta) de haba (abonada) y efecto residual en maíz y trigo por la aplicación de P (RF y SFT) y nitrógeno (urea).

Fuente	Dosis (kg/ha)		Haba (abonada)	Efecto residual	
	N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>		Maíz	Trigo
-	0	0	9.3 f	3.6	1.7 f
RF	0	150	11.0 cdef	3.5	1.9 f
STF	0	150	15.0 bc	9.5	4.8 ab
U	200	0	13.8 bcde	3.8	2.1 de
U + RF	200	150	15.7 b	3.7	0.7 f
U + STF	200	150	17.5 ab	9.8	3.0 bc
U + RF	200	750	14.7 bcd	5.1	2.1 de
	C.V.%		17.3	44.3	24.9
	D.M.S. (5%)		3.7	7.1 NS	1.9

En ambos suelos hubo respuesta a la aplicación de SFT y especialmente en combinación con N. El rendimiento extremadamente bajo del cultivo de papa en Toralapa se debe a una intensa sequía.

Los dos tipos de RF, UMSS y Porro, ambos pertenecientes al yacimiento "Capinota", tienen el mismo comportamiento como fuentes de P.

Las parcelas con aplicación de RF sin N, en ningún cultivo se distinguen del testigo, solo en interacción con N hay respuesta, pero se considera que esta, más que todo, se debe al N y no al P de la RF.

El aumento de la dosis de RF de 120 a 480 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/ha tampoco muestra efectos claros, ni en los primeros cultivos ni en los sub-siguientes. En el caso de Toralapa con clima frío se esperaba un efecto residual después de los 2-3 años, hecho que no ocurrió.

Cuadro 4. Efecto de la RF y SFT en cultivo de papa y su efecto residual en cereales. Rendimientos relativos con respecto al testigo (100%)

	Dosis (kg/ha)		Pairumani (bajo riego)			Toropalpa (en secano)			
	N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Papa abonado	Ensilaje (m.s.)* Efecto resid.	Trigo en grano Efecto resid.	Papa <sup>b</sup> Abonado	Cebada en grano Efecto residual	Avena Efecto residual	Avena* Efecto resid.
Testigo	0	0	100.0 e	100.0 ab	100.0	100.0 ab	100.0 ab	100.ab	100.0
RF Porro	0	120	112.7 e	107.2 ab	87.7	83.9 abc	135.9 ab	79.1 ab	88.1
RF UMSS	0	120	116.2 de	100.6 ab	85.1	83.5 abc	100.0 ab	74.6 b	92.9
SFT	0	120	154.7 bcd	121.9 a	90.9	97.7 ab	147.8 a	85.3 ab	96.3
Urea + RF Porro	80	120	196.8 abc	106.4 ab	87.7	70.3 cb	75.0 ab	104.7 ab	95.2
Urea + RF UMSS	80	120	200.4 abc	96.6 abc	104.5	51.9 c	79.3 ab	117.2 a	96.6
Urea + SFT	80	120	238.3 a	87.4 ab	101.0	113.1 a	94.6 ab	100.7 ab	103.8
Urea + RF Porro	80	240	177.2 abcd	78.7 ab	104.9	54.8 c	98.9 ab	105.7 ab	86.8
Urea + RF Porro	80	360	168.8 bcd	104.0 ab	83.4	68.0 bc	96.7 ab	114.2 a	94.4
Urea + RF Porro	80	480	141.8 cde	96.0 ab	85.4	66.0 bc	78.3 ab	96.1	96.1
C.V. (%)			28.0	31	16.0	28.0	45.8	22.8	27.8

\* Materia seca.

<sup>b</sup> Año de sequía.

### Tercera Fase: Comprobación en Parcelas de Campesinos

De manera general en las parcelas de campesinos (Cuadro 5) se confirmaron los resultados encontrados en las estaciones experimentales. No existe respuesta a la RF en cultivo de papa y tampoco se encontró un efecto residual con cereales. La respuesta a SFT es clara y muy significativa cuando está en combinación con urea. El resultado obtenido con urea + RF se atribuye en primer lugar a la urea.

Cuadro 5. Efecto de fuentes de P sobre el rendimiento de papa y su efecto residual en cereales en parcelas de campesinos en la zona andina.

Fuentes	Dosis (kg/ha)		Papa	Cereales
	N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Abonado 13 sitios	Efecto residual 6 sitios
Testigo	-	-	100.0 c	100.0
RF	0	120	109.5 c	98.3
SFT	0	120	133.8 bc	97.0
U+RF	80	120	124.3 bc	119.9
U+SFT	80	120	209.1 a	116.9
C.V. (%)			23.0	26.0
DMS (5%)			27.0	NS

Cabe indicar que en los 13 sitios se trabaja con suelos ligeramente ácidos a ácidos. A pesar de esto no se obtuvo respuesta con RF cruda, lo que motivó el abandono de la experimentación con RF cruda y el inicio de las investigaciones con RF parcialmente acidulada (RFPÁ) y agentes acidificantes.

### Cuarta Fase: el Efecto de Agentes Acidificantes Sobre la Reactividad de RF Capinota

Dos series de ensayos fueron realizados. La primera se realizó en suelos ácidos con el primer cultivo papa (Cuadro 6) y la segunda se efectuó en suelos alcalinos con maíz para ensilaje como cultivo principal (Cuadro 7).

Cuadro 6. Efecto de dos agentes acidificantes sobre la reactividad de la RF en suelos ácidos. Rendimientos relativos con respecto al testigo (100%).

Fuente	Dosis (kg/ha)		Coloni			Toralapa	
	N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Papa Abonado	Haba	Avena	Papa Abonado	Cebada
				1. Efecto residual	2. Efecto residual		Efecto residual
Testigo	0	0	100.0 cd	100.0	100.0	100.0 ab	100.0 ab
SA	80	0	150.1 a	96.4	95.9	158.7 a	162.0 a
RF	0	120	94.7 cd	109.0	98.7	103.9 c	115.2 ab
SA RF	80	120	143.9 abde	91.4	102.5	171.1 a	98.7 ab
Urea + RF	80	120	112.3 abcd	99.1	109.6	122.1 bc	77.2 b
Urea + RF + S	80	120	141.3 abc	90.8	88.6	144.6 ab	104.9 ab
RF + S	0	120	96.2 cd	83.4	94.5	103.1 c	127.2 ab
C.V. (%)			27.5	23.1	25.9	15.8	44.5

Los ensayos con papa demuestran con toda claridad e inclusive en suelos ácidos la superioridad del SA sobre U (Cuadro 6). Se atribuye este efecto a la respuesta a la aplicación de S en interacción con N, lo que se confirma comparando en la papa el efecto de U+RF (112.3% y 122.1%) con el efecto de urea + RF + S (141.3% y 144.6%). También en los cultivos siguientes se notó el mismo efecto. Este hecho ya conocido (Villarreal, 1985) no ha penetrado sin embargo, a la práctica puesto que los costos de transporte por unidad de N son más altos en SA que en U.

Efecto similar observamos en el cultivo de maíz en suelos alcalinos (Cuadro 7). En la localidad de la Tamborada es notoria la respuesta del maíz al S.

No se observó un efecto claro, en ninguno de los cultivos, de los agentes acidificantes (S, SA, SFT) sobre la reactividad de la RF ni en los suelos ácidos ni en los alcalinos.

#### **Quinta Fase; Respuesta de Cereales y Papa a la Aplicación de RFFA**

En diferentes tipos de suelos alcalinos se observaron variadas respuestas (Cuadros 8 y 9) de distintos cultivos a la RFFA; la papa y el trigo parecen responder mejor que el maíz.

En la localidad de Pirque (Cuadro 9) no hubo respuesta de la papa a la RFFA. El hecho de que el rendimiento con RFFA25 sea ligeramente superior al de RFFA50 parecería indicar que la RFFA se revierte a formas insolubles (IFDC, 1981), proceso que es más rápido con mayor grado de acidulación, pero sin embargo esto no se confirma en las otras localidades.

A pesar que en ninguno de estos ensayos realizados en parcelas de campesinos se tiene un coeficiente de variación fuera del rango aceptable para este tipo de trabajo, no se puede afirmar más que una tendencia a respuestas positivas de RFFA y RF Bayovar en interacción con N.

#### **Sexta Fase: Ensayos con Abonos Orgánicos y R.F.**

a) Ensayo en macetas con compost enriquecido con RF y S.

Los rendimientos en materia seca del trébol se observan en la Figura 1 y los del maíz en la Figura 2.

En el caso del suelo alcalino y con los dos tipos de compost se encontró una tendencia a incrementar los rendimientos donde hubo adición de azufre. En la combinación de roca fosfórica y azufre no hay un incremento considerable del rendimiento. Esto hace concluir que el aumento del

Cuadro 7. Efecto de agentes acidificantes urea, SA y S sobre la reactividad de RF en suelos alcalinos. Rendimientos relativos con respecto al testigo (100%).

	Dosis (kg/ha)			Violeta	Tamborada	
	N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	S	Maiz ensilaje	Maiz ensilaje	Avena efec.residual
Testigo	0	0	0	100.0 b	100.0 d	100.0 ab
RF	0	100	0	-	107.3 cd	102.2 ab
SFT	0	100	0	120.0 ab	135.6 bcd	103.4 ab
UREA	50	0	0	130.8 ab	159.0 abcd	106.1 ab
SA	50	0	57	121.2 ab	201.4 ab	99.8 ab
S	0	0	114	125.6 ab	151.5 abcd	106.5 b
RF + U	50	100	0	127.9 ab	186.8 abc	106.6 ab
RF + SA	50	100	57	117.0 b	176.3 abcd	82.3 ab
RF + U + S	50	100	114.3	121.9 ab	220.7 a	160.3 b
1/2 RF + 1/2 SFT	0	100	0	122.6 ab	161.3 abcd	83.6 b
1/2 RF + 1/2 SFT + U	50	100	0	147.7 a	150.5 abcd	81.8 b

Cuadro B. Respuesta de maíz y trigo a la aplicación de roca fosfórica parcialmente acidulada. Rendimiento relativo con respecto al testigo (100%).

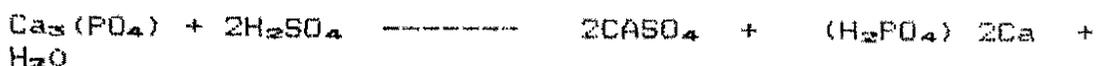
Fuentes	Dosis (kg/ha)		Tamborada					
	N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Tamborada		Parotani	Pirque	La Violeta	Tamborada
			Maíz ensilaje	Avena Ef. Residual	Avena Ensilaje	Maíz Ensilaje	Maíz Ensilaje	
Testigo	0	0	100.0 b	100.0	100.0 b	100.0 c	100.0	100.0 c
RF Bayobar	0	100	139.7 ab	92.9	95.2 b	143.3 abc	117.7	99.2 c
RF Capinota	0	100	102.8 b	93.4	102.9 b	119.7 bc	107.8	111.3 c
RFPA50 % Capinota	0	100	177.6 a	106.6	98.1 b	132.6 abc	113.9	111.5 c
Urea	50	0	177.6 a	105.6	145.2 a	157.7 abc	112.4	129.4 bc
RF Bayobar + U	50	100	154.2 a	93.6	143.3 a	194.9 a	127.6	131.6 bc
RFPA50 % Capinota + U	50	100	186.0 a	96.8	128.8 a	161.3 abc	121.1	169.8 a
RFPA25 % Capinota + U	50	100	167.3 a	85.3	128.5 a	175.9 ab	129.1	158.1 ab

\* Niveles en trigo N=30 P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> = 50 kg/ha respectivamente.

Cuadro 9. Respuesta del cultivo de la papa en la localidad Pirque a la aplicación de rocas fosfóricas crudas, aciduladas parcialmente y con urea.

Tratamiento	Dosis (kg/ha)		Rendimiento (kg/ha)
	N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	
Testigo (T)	0	0	---
Roca Bayovar (RB)	0	0	10903 ab
Roca Capinota	0	120	5694 c
Roca Capinota 50% (RC 50%)	0	120	9098 bc
Roca Capinota 25% (RC 25%)	0	120	8126 bc
Urea (U)	0	120	9723 ab
RB + U	80	0	10903 ab
RC50 + U	80	120	11458 ab
RC25 + U	80	120	12986 a
CV (%)			23.2

rendimiento en el caso del suelo alcalino se debe en primer lugar al azufre. Observando la absorción de fósforo por el trébol alejandrino, se nota un aumento significativo en la cantidad de fósforo absorbido causado por la adición de azufre. Ese resultado es más claro en el caso del estiércol bovino que en el caso del compost de basuras urbanas. Estos resultados confirman lo indicado en cuanto a los rendimientos; el azufre mejora el pH y permite a las plantas una mayor absorción del fósforo; sin embargo, la adición de fósforo mediante la roca fosfórica no ha aumentado los rendimientos, lo que permite concluir que las plantas se han abastecido de fósforo del suelo y del compost. Esta afirmación se confirma observando los tratamientos con roca fosfórica pura que son estadísticamente idénticos al testigo absoluto. Este hecho lo relacionamos al alto contenido de fosfatos cálcicos que contiene este suelo (Cuadro 1). Al añadir azufre baja el pH lo que induce la siguiente reacción química:



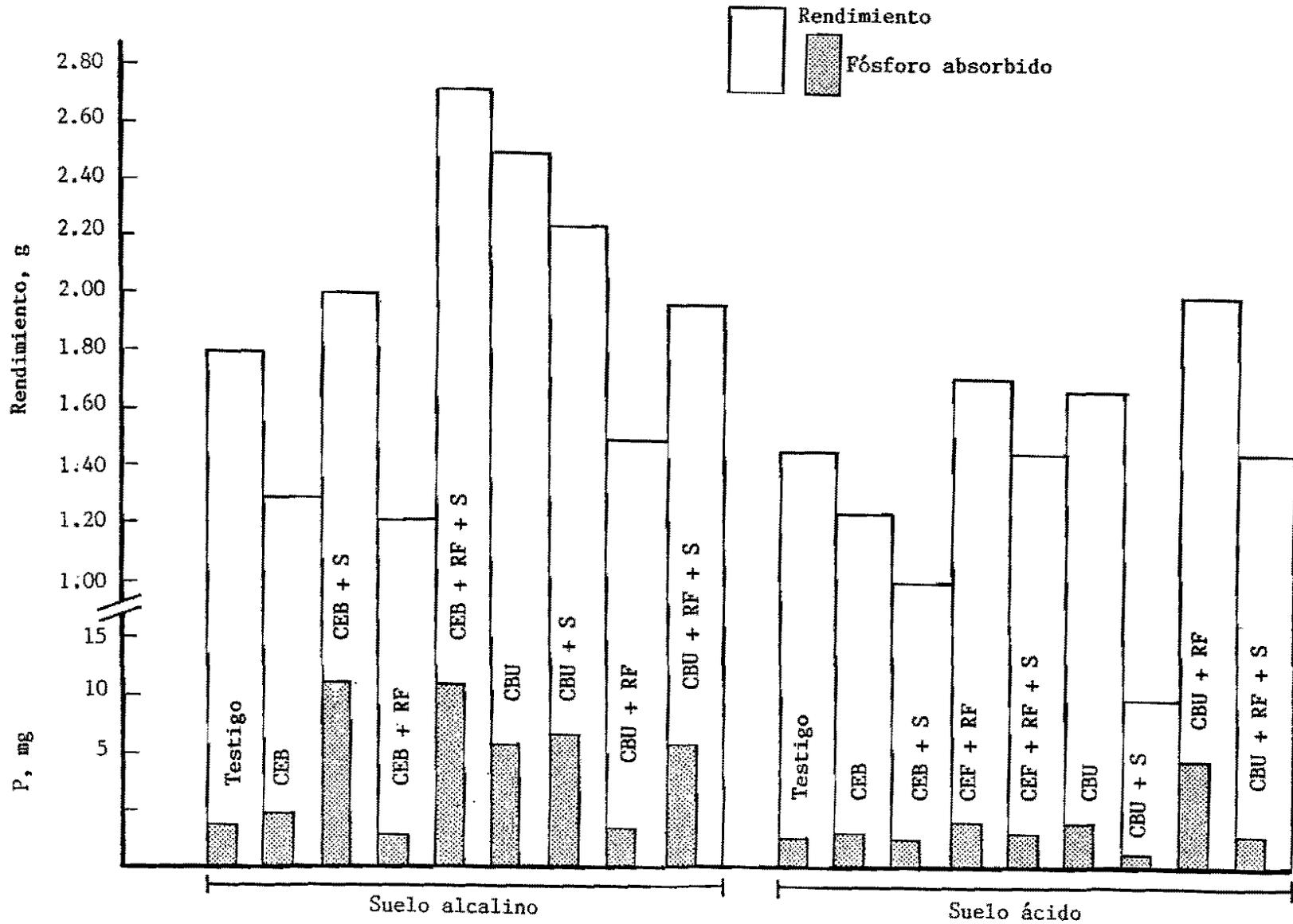


Figura 1. Rendimiento en materia vegetal seca (g/maceta) y fósforo absorbido (mg/maceta) del trebol alejandrino en dos suelos con la aplicación de RF, compost y azufre. CEB = compost estiércol bovino; CBU = compost basuras urbanas.

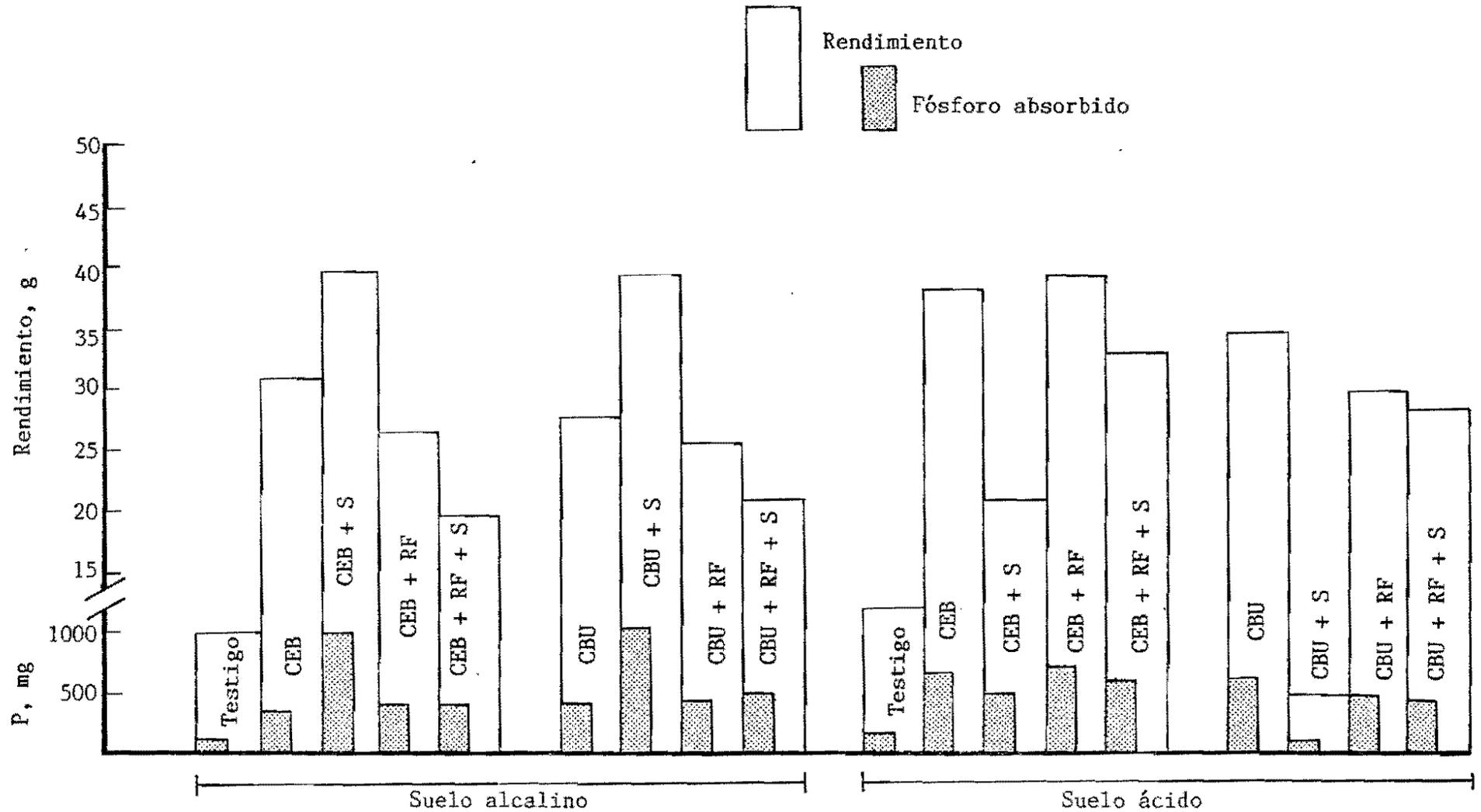


Figura 2. Rendimiento en materia vegetal seca (g/maceta) y fósforo absorbido (mg/maceta) por el maíz en dos suelos, con la aplicación de RF, compost y azufre.  
CEB = compost estiércol bovino; CBU = compost basuras urbanas.

En el suelo ácido se notan efectos contrarios que en el alcalino. Los rendimientos más elevados se observan con los tratamientos que contienen compost con roca fosfórica. La misma tendencia se observa pero más pronunciada, tomando como referencia el fósforo absorbido, donde la absorción de fósforo tiende a ser menor donde existe azufre en la mezcla. Esto puede tener relación con la fijación de fósforo por complejos férricos o con la influencia que tiene el azufre sobre el pH del suelo.

En el caso del maíz (Figura 2) y en el suelo alcalino la respuesta es significativa a la aplicación del azufre, tanto en el rendimiento en materia seca como también en la absorción de fósforo por la planta. O sea, se observa la misma tendencia que en el trébol alejandrino, pero con mayor claridad, eso posiblemente se debe a los mayores requerimientos de fósforo y azufre que tiene el cultivo de maíz.

En el suelo ácido se observa la misma tendencia que con el trébol alejandrino. El azufre causa bajas de los rendimientos y de la absorción de fósforo aun por debajo del nivel del testigo absoluto.

Con la adición de roca fosfórica se obtiene, únicamente en el caso de compost de estiércol bovino, la mayor absorción de fósforo combinado con el rendimiento más elevado. Por efecto de la aplicación de roca fosfórica se eleva ligeramente el pH influyendo positivamente en el desarrollo del cultivo de maíz. En el caso del compost de basuras urbanas se observa este hecho únicamente en el rendimiento pero no en la absorción del fósforo.

Se puede mencionar, en general, que el pH tiene un gran efecto sobre las formas del fósforo en el suelo, ya que el fosfato ligado al calcio se considera que es estable en suelos alcalinos, así como los fosfatos ligados a Fe y Al lo son en los suelos ácidos. Cuando el fósforo se encuentra ligado al Fe y Al se vuelve más soluble al elevarse el pH, lo que se logra con la aplicación de compost y/o roca fosfórica; en cambio, con la aplicación de azufre se baja el pH y se da un proceso inverso.

#### b) Ensayo en microparcels en la localidad Apote

En el Cuadro 11 se presentan los resultados del ensayo en micro-parcelas. Al igual que en los ensayos en macetas, se observa que el compost de basuras urbanas es inferior a los otros dos, lo que atribuimos al mismo hecho ya discutido en el ensayo mencionado.

Cuadro 10. Efecto de abonos orgánicos sobre la reactividad de la RF. Rendimientos relativos con respecto al testigo (100%).

Fuente	Dosis (kg/ha) N-P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> -K <sub>2</sub> O	Tamborada					
		-----		Paratani	Pirque	La Violeta	Tamborada
		Maiz ensilaje	Avena Ef. Residual	Maiz Ensilaje	Maiz Ensilaje	Maiz Ensilaje	
Testigo	0- 0- 0	100.0 b	100.0	100.0	100.0 c	100.0 b	100.0
C.D.V.*	80-70-60	117.8 ab	134.2	88.0	103.4 c	121.1 a	143.9
C.D.V. + RF Fermen.	86-70-60	132.0 ab	125.4	79.7	114.0 bc	128.3 a	133.2
C.D.V. + RF sin ferm.	80-70-60	122.4 ab	126.1	84.5	128.2 abc	133.7 a	151.8
CV (%)		19.8	32.9	26.6	15.9	8.4	24.1

\* C.D.V. = Compost de desechos vegetales 8600 kg de materia seca/ha.

Cuadro 11. Rendimiento en materia seca y fósforo absorbido de trébol alejandrino.

Tratamientos	Rendimiento en		P absorbido (g/microparcela)	
	RF (%)	S (%)		materia seca (g/microparcela)
Material orgánico				
Testigo absoluto			533.5 d	1.10
CEB	0	0	1042.2 bc	3.81
CEB	0	2	1015.2 bc	3.33
CEB	20	0	992.8 bc	3.50
CEB	20	2	1052.2 bc	4.11
CBU	0	0	1175.8 abc	3.25
CBU	0	2	980.4 c	2.52
CBU	20	0	1058.6 abc	2.72
CBU	20	2	1086.8 abc	4.03
EF	0	0	1014.8 bc	3.80
EF	0	2	1113.8 abc	4.45
EF	20	0	1259.4 a	5.00
EF	20	2	1203.0 ab	4.90
CV (%)			30.0	14.0

CEB = Compost de Estiercol Bovino.

CBU = Compost de Basuras Urbanas.

EF = Estiercol Bovino Fresco.

% RF y % S = Corresponden a las cantidades añadidas al material orgánico, previo a la fermentación.

Una tendencia a mayores rendimientos se observa con los tratamientos con estiercol fresco, lo que se debe a la mayor presencia de nitrógeno de este abono, muy necesaria para el desarrollo inicial de las leguminosas, mientras que no funciona la fijación de nitrógeno a través de *Rhizobium*.

En cuanto a la absorción de fósforo constatamos una tendencia similar al ensayo en macetas en el suelo alcalino, pero menos pronunciado. Eso debido a que el pH de ese suelo es inferior al utilizado en el ensayo en maceta. Se observa un efecto del azufre en combinación con estiércol. Eso indica que la fermentación aeróbica no ha tenido un efecto significativo sobre la actuación del azufre hacia la RF.

### Conclusiones

En todos los ensayos realizados con RF en macetas, en estaciones experimentales y en parcelas de campesinos, tanto en la zona de valle como en Alto Andinos, no hubo respuesta a la aplicación de RF. Independiente del pH del suelo y del cultivo, no hubo respuesta en el primer cultivo ni de los subsiguientes.

Agentes acidificantes como S, SA, y SFT no tuvieron efectos claros sobre la reactividad de la RF ni en los suelos ácidos ni en los alcalinos, tampoco se observó un efecto residual significativo.

En suelos alcalinos y en zonas de valle hay una tendencia a respuesta positiva con RFPA al 25 y 50% de acidulación.

La fermentación aeróbica de materia orgánica con presencia de RF parece aumentar ligeramente la reactividad de la RF.

Generalmente se encontró reactividad baja de la RF "Capinota" en Entisoles e Inseptisoles de la zona Andina.

## REFERENCIAS

- Augstburger, F. 1983. Agronomic and Economic Potential of Manure in Bolivian Valleys and Highlands, *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 10 (1983) pp. 335-345.
- Wangh, A.L.; Cate, R.B.; Nelson, L.A. 1973. Modelos discontinuos para una rápida correlación, interpretación y utilización de los datos de análisis de suelo y las respuestas a los fertilizantes. *International Soil Fertility Program, Boletín Técnico No. 7.*
- González, A. 1984. Descripción de los yacimientos de roca fosfórica en Bolivia, en la Roca Fosfórica fertilizante directo de bajo costo, GLIRF, Cochabamba, Bolivia.
- IFDC, 1981. Characterization of three phosphate rock samples from Capinota Bolivia, IFDC/CIAT Project, 1981.
- IFDC, 1986. Sulfuric Acid-Based Partially Acidulated Phosphate Rock; its production, cost and use, TP963.4.59585.
- Rodríguez, R.F. 1981. Preliminary evaluation of the fertilizing quality of powdered minigranulated and partially acidulated phosphoric rock from Capinota, Bolivia. Training Report, CIAT, Cali, Colombia, August, 1981.
- Villarroel, J. 1985. Informe de Investigaciones con Abonos Orgánicos, Roca Fosfórica y sistemas de cultivo, Proyecto Agrobiología Cochabamba. Fundación Pro-Bolivia.

## 7. EFICIENCIA AGRONÓMICA DE LA ROCA FOSFORICA EN SUELOS DE COLOMBIA

J. Navas A.\*

### RESUMEN

El Programa Nacional de Suelos del Instituto Colombiano Agropecuario, ICA, desde 1970 mediante estudios de laboratorio, invernadero y campo, ha determinado la efectividad agronómica de fuentes de fósforo como el superfosfato triple, Escorias Thomas y rocas fosfóricas. Los resultados obtenidos muestran que las rocas fosfóricas varían en su efectividad como abono de acuerdo a características del suelo y de los cultivos. En los Llanos Orientales, cultivos como el maíz y el pasto *Brachiaria decumbens* muestran una respuesta positiva a la aplicación directa de rocas fosfóricas, mientras que el arroz (riego y secano), maíz, mani y sorgo produjeron con roca fosfórica parcialmente acidulada o superfosfato triple resultados similares. En suelos Andosoles, la papa ha respondido a la aplicación de superfosfato triple y roca fosfórica parcialmente acidulada. Las aplicaciones de gallinaza sola produjeron aumentos en el rendimiento de la papa pero no hubo aumentos cuando se mezcló con roca fosfórica. También se encontró respuesta de la caña de azúcar a las aplicaciones de roca fosfórica.

### Introducción

Colombia por sus especiales características fisiográficas, climáticas y edáficas presenta una diversidad de suelos en todo su territorio, lo cual se traduce en diferentes tipos de limitantes nutricionales de acuerdo al cultivo y la región. El fósforo es uno de los nutrimentos de mayor importancia en la fertilización agrícola, su deficiencia se presenta en todos los pisos térmicos (frío, medio y cálido). La casi totalidad de los cultivos de importancia socio-económica ven limitada su productividad por deficiencia de este elemento, por lo que se requiere de la fertilización fosfatada para una adecuada producción.

La demanda de fertilizantes fosfatados para 1986, se estimó en 79.042 toneladas de  $F_2O_5$ , comparadas con 189.000 de Nitrógeno y 95.000 de  $K_2O$ . Igualmente, estimativos sobre la demanda potencial de fósforo en el país, basados en una adecuada fertilización, indican un déficit de fertilización

---

\*Instituto Colombiano Agropecuario, ICA - Tibaitatá, Bogotá, Colombia.

de 304.000 toneladas de  $P_2O_5$  comparados con 189.000 toneladas de déficit para nitrógeno y de 247.000 toneladas de déficit para  $K_2O$ .

El subconsumo de fertilizantes fosfatados se presenta especialmente en los cultivos de: pastos, maíz, caña panelera, papa, plátano, caña de azúcar, café y arroz.

Las reservas recuperables de roca de Colombia, se estiman en 31 millones de toneladas en los yacimientos del Huila, Norte de Santander y Boyacá.

La demanda de fertilizantes fosfóricos es abastecida en un 90% a través de importaciones y solo un 10% es de origen nacional. Esta situación se representa como importante fuga de divisas para la economía nacional.

### Investigaciones del Programa Nacional de Suelos

El Programa Nacional de Suelos del Instituto Colombiano Agropecuario, ICA, con el fin de contribuir al conocimiento, caracterización y solución de la problemática del fósforo en el país, ha desarrollado investigaciones en diversas regiones y cultivos de importancia económica y social.

Estas investigaciones han versado sobre la caracterización del nivel de fertilidad de los diferentes tipos de suelos del país para los distintos cultivos y elementos nutritivos, el grado de respuesta a la fertilización química de diferentes cultivos en diferentes regiones, la calibración de los métodos de laboratorio para un determinado extractante de fósforo con respecto a la respuesta del cultivo a nivel de campo, y por último, la definición de los requerimientos nutricionales de los diferentes cultivos por región, para alcanzar niveles apropiados de producción.

Dentro de estas investigaciones se destacan aquellas tendientes a evaluar la efectividad agronómica de diferentes fuentes de fertilizantes fosfatados para varios cultivos. Se le ha dado prioridad a fuentes como: Superfosfato triple, Escorias Thomas y rocas fosfóricas. Las investigaciones con roca fosfórica, se remontan a la década del 70 y se ha buscado evaluar a través de estudios de laboratorio, invernadero y campo la eficiencia agronómica de materiales provenientes de los diferentes yacimientos existentes en el país.

Las investigaciones desarrolladas en diferentes regiones ecológicas del país y diversos cultivos, permiten obtener un adecuado nivel de conocimiento de la calidad como fertilizante del fósforo proveniente de estas rocas. Los estudios se han localizado en los departamentos de Nariño, Cundinamarca, Boyacá, Antioquia, Norte de Santander y Llanos

Orientales, con cultivos como papa, pastos, arroz, caña de azúcar, maní, maíz y sorgo.

Se han detectado respuestas positivas de varios cultivos a la aplicación de roca fosfórica, comparada con otras fuentes, a las que igualan o superan en eficiencia agronómica como fuente de fósforo. Igualmente se presentan los resultados de aplicaciones de roca fosfórica complementada con otros materiales tendientes a mejorar la disponibilidad o acelerar la reactividad del fósforo, tales como gallinaza, azufre y fuentes nitrogenadas como urea y sulfato de amonio; como también los resultados obtenidos con la roca fosfórica parcialmente acidulada a través de adiciones de ácido sulfúrico.

Los resultados obtenidos muestran que la roca fosfórica varía en su efectividad como abono, de acuerdo a las características del suelo y de los cultivos.

En suelos de los Llanos Orientales, clasificados como Ultisoles y Entisoles en su gran mayoría, las rocas fosfóricas mostraron un efecto significativo y benéfico tanto en la primera cosecha como en su efecto residual. Estudios de fuentes de fósforo en suelos de clase III y IV en el cultivo de maíz, mostraron un efecto positivo y significativo de las rocas fosfóricas, y su efecto residual fue superior al del superfosfato triple. La respuesta del pasto Brachiaria decumbens a la roca fosfórica, en su rendimiento de forraje seco fue significativamente mayor a los testigos y similar a la obtenida con superfosfato triple. Con el cultivo del maní la eficiencia comparativa de las fuentes de P fue así: Escorias Thomas > Superfosfato triple > Roca Fosfórica.

Las rocas fosfóricas parcialmente aciduladas produjeron resultados similares a los obtenidos con superfosfato triple, y superiores a las obtenidas con aplicaciones directas de rocas fosfóricas. En general en los Llanos Orientales, en los suelos de clase III y IV los resultados han sido positivos en cultivos anuales (arroz riego, arroz seco, maní, maíz y sorgo).

En los suelos de los departamentos de Cundinamarca, Boyacá y Nariño, clasificados en su mayoría como Andosoles, las aplicaciones directas de rocas fosfóricas en cultivos como la papa, no han tenido efectos significativos en la productividad, en contraste con las respuestas significativas a la aplicación de superfosfato triple. Las mezclas con materiales como azufre, sulfato de amonio, urea y gallinaza no aumentaron la productividad del fósforo de la roca fosfórica y no se obtuvo respuesta del cultivo de la papa a sus aplicaciones. Las aplicaciones de gallinaza sola produjeron aumentos altamente significativos en el rendimiento de la papa. Aplicaciones de rocas fosfóricas

parcialmente aciduladas en dosis de 300 kg/ha de  $P_2O_5$ , produjeron aumentos altamente significativos en la producción de papa, similares a los obtenidos con el superfosfato triple.

En Antioquia, en Andosoles de clima medio bajos en fósforo, hubo respuesta positiva y significativa de la caña de azúcar a las aplicaciones de roca fosfórica, en dosis de 150 kg/ha de  $P_2O_5$ . En el cultivo del maíz también se obtuvieron respuestas positivas a las aplicaciones de roca fosfórica.

En el departamento de Norte de Santander, en suelos clasificados como Andosoles, el cultivo de la papa presenta respuestas significativas a las aplicaciones de roca fosfórica en suelos bajos en fósforo (< 15 ppm). Se pueden obtener buenas producciones de papa (mayores a 20 toneladas/ha), con 200 kg/ha de  $P_2O_5$  como superfosfato triple o con 300 kg/ha de  $P_2O_5$  como roca fosfórica. En suelos bajos en fósforo, se encontró respuesta positiva del cultivo del arroz, a la aplicación de roca fosfórica en dosis de 100 a 150 kg/ha de  $P_2O_5$ .

Los resultados de estas investigaciones muestran la gran importancia que tienen las reservas de roca fosfórica en el país, las cuales pueden llegar en un futuro, con el uso adecuado de tecnologías tanto en el ámbito agronómico de fertilización como de proceso industrial a constituirse en una alternativa importante para la fertilización fosfórica, con su consecuente impacto positivo en el ahorro de divisas, desarrollo de la industria nacional, y posiblemente disminución en los costos de la fertilización.

## B. EVALUACION AGRONOMICA DE FERTILIZANTES FOSFATADOS EN ZONAS ALTAS DE ECUADOR

José Espinosa<sup>a</sup>  
Franklin Valverde<sup>a</sup>  
Juan Córdoba<sup>a</sup>  
Vicente Novoa<sup>a</sup>  
R. Vera<sup>a</sup>

### RESUMEN

Se evaluaron RF de diferente procedencia, granulación, cogranulación y acidificación en invernadero y campo en el Ecuador. En invernadero la respuesta en la mayoría de los suelos agrupó a las RF así: Florida < Carolina del Norte < Bayoban; la aplicación de RF sin tratar, así como las cogranuladas con S, el SFS y el SFT incrementaban el rendimiento de las plantas indicadoras, a medida que el tamaño de las partículas disminuía; en todos los suelos la mezcla RF + S fue la de menor rendimiento, mientras que las mezclas RF + SFS y RF + SFT incrementaban los rendimientos a medida que se incrementaba la proporción de superfosfato, pero con respecto al tamaño de los gránulos no se encontraron diferencias apreciables. Experimentos de campo con papa y pastos confirmaron las tendencias arriba mencionadas y además demostraron que la acidulación parcial incrementa significativamente la efectividad de la RF. La roca nativa Napo acidulada al 25% aplicada a Rye grass Pichincha produjo resultados similares a los obtenidos con el SFT.

### Introducción

El desplazamiento del continente americano hacia el oeste, durante el período Cretácico y Terciario, permitió la formación de la actual cordillera de los Andes. Durante el Pleistoceno, movimientos verticales de gran magnitud afectaron en forma diferente la sierra volcánica ecuatoriana. Es así como desde 1° de latitud norte, en la frontera con Colombia, hasta 2°30' latitud sur, se originaron una serie de volcanes que alcanzan alturas de hasta 5.000 msnm.

Esta distribución permitió individualizar dos áreas geológicas que caracterizan el material parental del suelo. La sierra central y norte (arriba del paralelo 2°30') tiene un basamento volcánico mientras la parte sur tiene como

---

<sup>a</sup>Técnicos del Departamento de Suelos del INIAP. Quito, Ecuador.

material base principalmente roca metamórfica y/o volcánica antigua.

En la zona norte los volcanes produjeron frecuentemente materiales andesíticos y dacíticos en forma de flujos de lava y materiales piroclásticos principalmente ceniza volcánica (Maldonado et al., 1985). En el Ecuador la mayoría de los suelos de altura han sido clasificados como Inceptisoles, suborden Andepts y como Mollisoles (González et al., 1986). Estos suelos son conocidos por su alta capacidad para fijar fósforo (P) (Wada, 1980) lo que hace que este elemento sea otro factor limitante en la producción de cultivos después del nitrógeno (N). Por otro lado, la presión demográfica y las condiciones fisiográficas han incentivado una agricultura de subsistencia de bajo uso de insumos y de bajos rendimientos. Dentro de este esquema es aparente la necesidad de desarrollar fuentes baratas y eficientes de fertilizantes fosfatados que permitan incrementar los rendimientos del sistema mencionado. Por otro lado en cultivos rentables como la papa, el agricultor empresarial y el de subsistencia utilizan apreciables cantidades de fertilizantes fosfatados con la expectativa de buenos rendimientos respaldados casi siempre con buenos precios de mercado. Esta situación también se beneficiaría de fuentes eficientes de material fosfatado que puedan suplir adecuadamente la alta demanda de P de este tubérculo. La demanda de fertilizantes fosfatados se satisface con materiales importados de alto costo. Una alternativa para suplir los fertilizantes fosfatados, sería el uso de materiales de relativo bajo costo, aprovechando los yacimientos de roca fosfórica descubiertos en la amazonia en 1983.

## Naturaleza de los Yacimientos de Fosforita en el Ecuador

### **Localización Geográfica y Geológica**

La roca fosfórica Napo (RFN), se halla distribuida en una superficie de 800 km<sup>2</sup> ubicada en la provincia de Napo, en el nor-oriental ecuatoriano. Los yacimientos tienen como límites naturales al norte los ríos Cofanes-Aguarico y al sur el río Quijos. Los límites oriental y occidental coinciden con las coordenadas 77° 23' cerca a la confluencia de los ríos Aguarico y Due y 77° 37' en el flanco oriental del volcán Reventador. El material se localiza en una plataforma marina Cretácica. Estratigráficamente los niveles fosfáticos se encuentran en el miembro superior de la formación Napo con edades desde el Coniaciano al Campaniano (88-74 x 10<sup>6</sup> años). El ciclo sedimentario mayor de este miembro corresponde a una transgresión sobre plataforma calcárea y una regresión-emergencia que estuvo acompañada de volcanismo. La regresión también significó un cambio físico-químico de un ambiente euxínico a un ambiente oxidante. El espesor varía entre 20 m al sur donde está

erosionado a 120 m al norte. El contacto inferior es concordante sobre el miembro calcáreo y discordante con la suprayacente Formación Tena.

#### Niveles Fosfáticos

El nivel basal denominado A consiste de hasta siete estratos de fosforita ( $A_0, A_1, \dots$ ) intercalados con lutitas negras a excepción de la primera intercalación que es caliza. El espesor de los estratos varía entre 0.1 m y 0.8 m siendo generalmente más grueso el estrato  $A_3$ . La relación entre el espesor total y el espesor de fosforitas en los niveles  $A_1-A_2-A_3$  está entre 60 y 70% con espesores totales que van desde 1.6 m hasta 2.2 m que permiten su explotabilidad. El contenido de  $P_2O_5$  en las fosforitas de los niveles  $A_1-A_2-A_3$  es de 20 a 30% mientras que el de las lutitas es de 3 a 14%. El nivel intermedio o B está caracterizado por estratos finos de fosforitas y lutitas fosfáticas (<0.1 m). Este nivel no tiene importancia económica. El nivel superior o C se localiza a pocos metros bajo el contacto Napo-Tena y consiste en dos niveles de fosforitas con espesores entre 0.1 y 1.0 m intercalados con lutitas silíceas. La relación espesor total y espesor de fosforitas de  $C_1$  y  $C_2$  es 40 a 60% con espesores totales entre 1.2 y 1.6 m. El contenido promedio en  $P_2O_5$  de las fosforitas en  $C_1 - C_2$  está entre 15 y 20%.

#### Aspectos Económicos de los Yacimientos

Los sectores de los yacimientos  $A_1-A_2-A_3$  y  $C_1-C_2$  que tienen los mejores espesores se consideran com áreas mineras. Sin embargo, un limitante fundamental para su explotación es que sólo una cantidad insignificante del nivel C se podría explotar a cielo abierto mientras que la totalidad del A debe ser explotado en subterráneo, con sobre cargas mínimas de 80 M. En el Cuadro 1 se detallan las condiciones de las áreas mineras.

#### Efectividad Agronomica de Varias Rocas Fosfóricas (RF) en Ensayos de Invernadero

Los ensayos preliminares de invernadero se iniciaron en 1979. Se utilizaron tres suelos de la sierra alta ecuatoriana y uno de la región amazónica (Cuadro 2). Los suelos Tufiño, Pugro y Aloag, clasificados como Distrandepets son suelos negros de altura con alto contenido de materia orgánica y una reconocida capacidad para fijar altas cantidades de P. El suelo Payamino, por el contrario, es un suelo rojo de la amazonía clasificado como Distropept de pH bajo pero aparentemente con menor capacidad de fijación de fósforo.

Cuadro 1. Descripción de las áreas mineras de los yacimientos de RFN

Zona minera	Area (km <sup>2</sup> )	Nivel fosfórico	Espesor neto (m)	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> promedio (%)	Reserva probable (t x 10 <sup>4</sup> )	Recuperación a cielo cubierto (%)
Due NE	50	C1-C2	0.73	19	73	10
Due E	36	C1-C2	0.30	20	25	0
Due NW	2	C1-C2	0.80	20	2	80
Dashiño	35	A1-A3	0.76	24	53	0
Reventador	15	A1-A3	0.63	23	19	0
Tigre	13	A1-A3	0.70	24	19	0
Sumaco	11	A1-A3	0.60	25	14	0

Cuadro 2. Descripción de los suelos usados en los ensayos preliminares de invernadero.

Localidad	Clasificación	pH	P	K	Ca	Mg	Al + H
Tufiño	Dystrandept	5.4	10	0.44	8.0	0.83	1.1
Aloag	Dystrandept/Cryandept	6.0	4	0.29	6.8	0.81	-
Pugro	Dystrandept	5.7	4	0.27	5.5	0.67	0.8
Payamino	Distroept	5.4	3	0.16	4.0	1.05	1.3

Se evaluaron las rocas fosfóricas Florida (RFF), Carolina del Norte (RFCN) y Bayovar (RFB). Las RF fueron preparadas en diferentes granulaciones (gránulo, -6/+14 mesh, minigránulo, -48/+150 mesh y polvo) en varias relaciones con azufre, superfosfato triple (SFT) y superfosfato simple (SFS) y además las rocas RFF y RFB fueron aciduladas parcialmente (Cuadro 3). Todos los materiales se aplicaron al suelo en una cantidad equivalente a 200 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/ha. Se

utilizó sorgo (*Sorghum vulgare*) como planta indicadora. Los resultados de las pruebas de invernadero se resumen a continuación.

Cuadro 3. Combinación de tratamientos de las rocas fosfóricas utilizadas en los experimentos de invernadero.

	RFF			RFCN			RFB		
	Gránulos	Minigránulos	Polvo	Gránulos	Minigránulos	Polvo	Gránulos	Minigránulos	Polvo
Rel. RF:S	1:0.5	1:0.5	1:0.5	1:0.5	1:0.5	1:0.5	1:0.5	1:0.5	1:0.5
	1:1	1:1	1:1	1:1	1:1	1:1	1:1	1:1	1:1
Rel. RF:SFT	3:1	3:1	3:1	3:1	3:1	3:1	-	-	-
	1:1	1:1	1:1	1:1	1:1	1:1	-	-	-
	1:3	1:3	1:3	1:3	1:3	1:3	-	-	-
Rel. RF:SFS	3:1	3:1	3:1	3:1	3:1	3:1	-	-	-
	1:1	1:1	1:1	1:1	1:1	1:1	-	-	-
	1:3	1:3	1:3	1:3	1:3	1:3	-	-	-
Acidulación									
parcial	20%	20%	20%	-	-	-	20%	20%	20%

### Respuesta a la Aplicación Directa de RF sin Tratamiento

El rendimiento obtenido con la aplicación directa de RF al suelo en ninguna localidad fue superior al obtenido con SFT o SFS en los mismos suelos (Figura 1). Las RF incrementaron el peso de materia seca de sorgo de acuerdo a su reactividad (Chien y Hammond, 1978; León y Fenster, 1979), agrupándose de la siguiente manera: RFCN > RFB > RFF. Si se asume el rendimiento de materia seca obtenido con SFT como 100%, se observa con la RFCN un rendimiento relativo de 46, 58 y 59% en los suelos de Tufiño, Pugno y Aloag respectivamente, mientras que el rendimiento relativo de la RFB es de 44, 41 y 54% en los mismos suelos (Figura 1). Estos rendimientos relativos son menores que los obtenidos con estas rocas en el suelo Payamino donde alcanzan un 76%. Esto último indicaría una mejor efectividad de las rocas debido a la menor capacidad de fijación de P y/o a las diferentes condiciones edáficas, especialmente pH, que permitirían una mejor disolución de las rocas en el suelo.

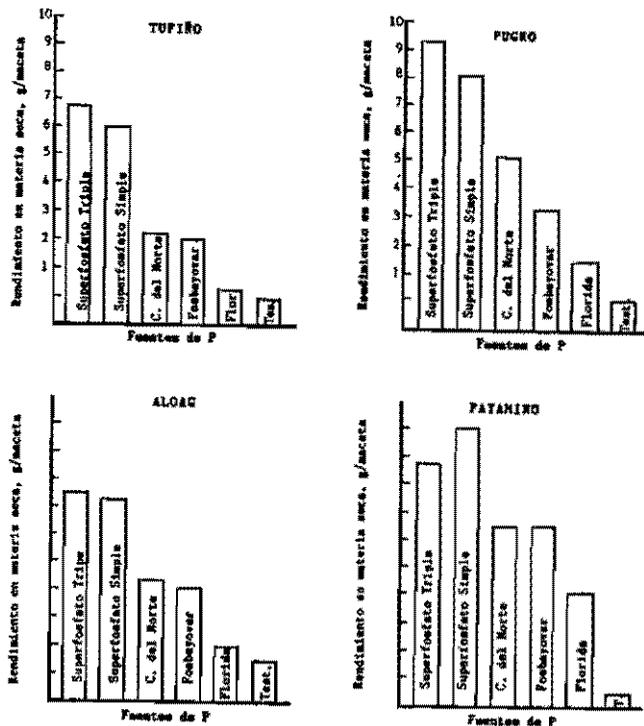


Figura 1. Respuestas a la aplicación directa de diversas fuentes de P a cuatro suelos en ensayos de invernadero.

La respuesta a la aplicación de RF a suelos volcánicos (Andepts) no ha sido consistente en diferentes estudios y el rol de la capacidad de fijación de P de estos suelos, frente a la respuesta a la aplicación directa de RF no está bien entendida. Se considera que la eficiencia agronómica de la RF sería mejor en suelos de alta capacidad de fijación de P debido a su lenta solubilización que aumentaría la oportunidad para que las raíces tomen P antes de que este sea fijado (Hammond, Chien y Mokwunye, 1986).

#### Respuesta al Tamaño de las Partículas de RF

Las respuestas a la aplicación de las RF con diferentes granulaciones en los suelos en estudio se observa en Figura 2.

En los cuatro suelos estudiados, el incremento en el tamaño de la partícula de las rocas fosfóricas redujo los rendimientos de materia seca. La menor superficie de contacto obtenida al incrementar el tamaño de las partículas de las rocas fosfóricas tiende a reducir la disponibilidad de P en el suelo (Hammond, Chien y Mokwunye, 1986). Cuando se probó el SFT y SFS en gránulos normales y en polvo se observó que la respuesta fue diferente. La mayor superficie de contacto de estos materiales en forma de polvo fino permitió que los fosfatos solubles entraran rápidamente en contacto con el suelo y se fijaran aceleradamente. Cuando el SFT y SFS fueron aplicados como gránulos se obtuvo una mayor respuesta en rendimiento de materia seca.

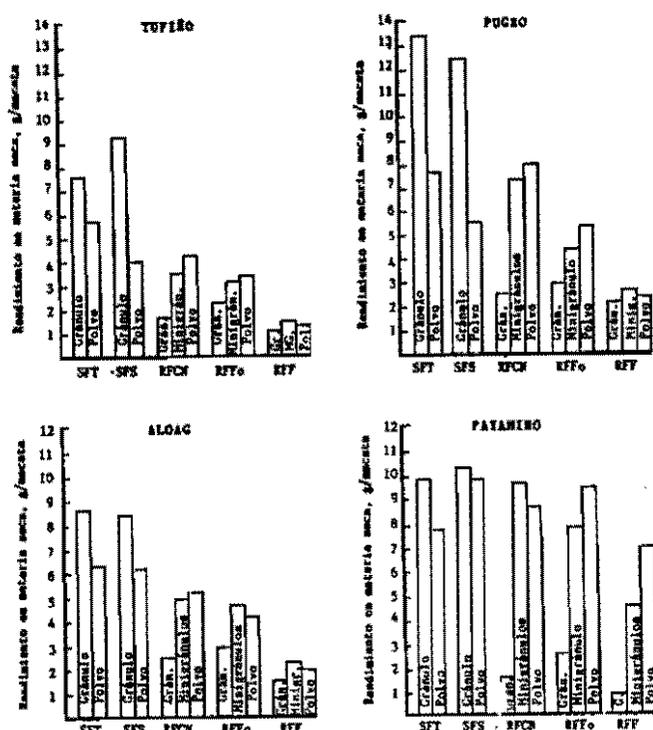


Figura 2. Respuesta a la aplicación de diversas fuentes de P en diferentes tamaños de partículas a cuatro suelos en ensayos de invernadero.

### Respuesta de las mezclas cogramuladas de RF con SFT y SFS

Se estudió la efectividad agronómica de RFF y RFCN en cogramulación con SFT y SFS en relaciones RF:SFT/SFS de 3:1; 1:1 y 1:3. La Figura 3 ilustra los resultados obtenidos. El SFT y SFS contienen fosfato monocálcico que al ser aplicado al suelo se transforma en fosfato dicálcico y ácido fosfórico. El ácido fosfórico reaccionaría con la RF provocando la presencia de más fosfato soluble (León y Fenster, 1979). Los resultados de este experimento indican que la respuesta obtenida en estos suelos está más bien asociada con la cantidad de fosfatos solubles presentes en la granulación. Mientras menor es la proporción de RF en la mezcla mayor es la producción de materia seca en el invernadero en todos los suelos utilizados. En los suelos El Fugro y Payamino la cogramulación con SFS, en todas las relaciones obtuvo mejores rendimientos de materia seca que con SFT. Esto puede deberse a que en estos suelos había también respuesta a la aplicación de S.

### Respuestas de las Mezclas RF y S

La mezcla de RF con azufre fue diseñada para probar el posible efecto acidulante del S en la RF, esperando de este modo producir más P soluble (IFDC/CIAT, 1986). Las relaciones RF:S estudiadas fueron 1:0; 1:0.5 y 1:1 con RFF, RFCN y RFB. Los resultados (Figura 4) en rendimiento de materia seca en invernadero con los cuatro suelos indican que no existió ningún incremento significativo en la adición de azufre en la mezcla.

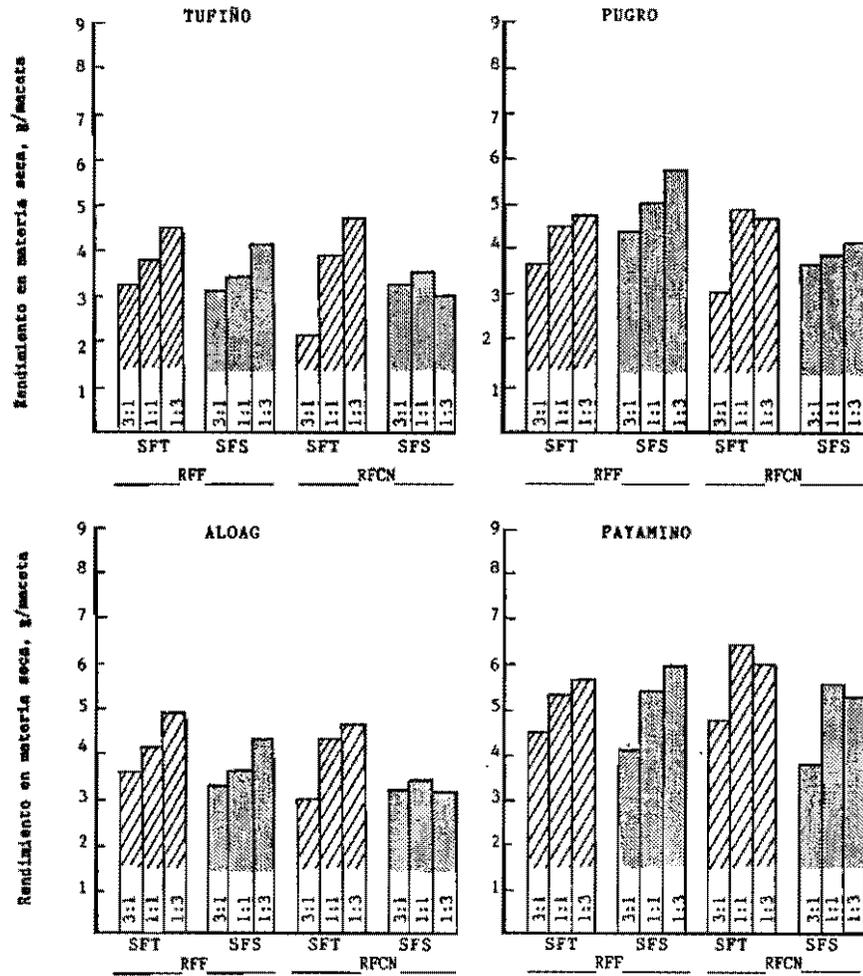


Figura 3. Respuestas a la aplicación de mezclas cogranuladas de RF con SFT y SFS a cuatro suelos en ensayos de invernadero.

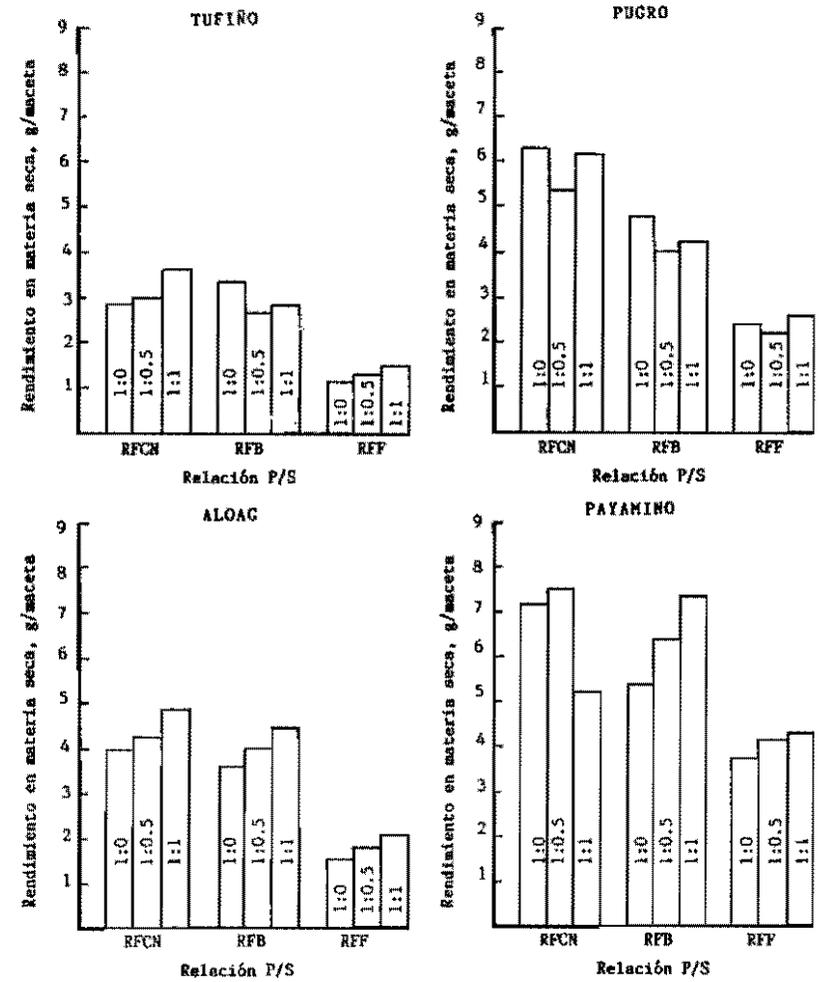


Figura 4. Respuestas a la aplicación de mezcla de RF con azufre en ensayos de invernadero.

### Respuesta a la Aplicación de RF Parcialmente Acidulada

Las RFF y RFCN fueron parcialmente aciduladas con el 20% de  $H_2SO_4$  necesario para la obtención de superfosfato simple. Este procedimiento incrementa el P soluble y podría ser una buena alternativa para la utilización de rocas insolubles (Hammond, Chien y Mokwunye, 1986; IFDC/CIAT, 1986). Los resultados de las pruebas en invernadero (Figura 5) indican que la acidulación parcial de las rocas permitió un incremento significativo del rendimiento en materia seca frente al testigo sin P. El efecto generado por las diferentes granulaciones de las rocas parcialmente aciduladas fue el mismo que el observado con la disminución de tamaño de SFT y SFS lo que indica mayor presencia de fosfatos solubles. Si se asume el rendimiento relativo obtenido con el SFS en gránulos como 100%, la RFF parcialmente acidulada en gránulos produjo rendimientos relativos de 67, 58, 72 y 72% en los suelos Tufiño, Fugro, Aloag y Payamino respectivamente. El rendimiento relativo de RFCN, en las mismas condiciones, fue de 58, 70, 75 y 78%.

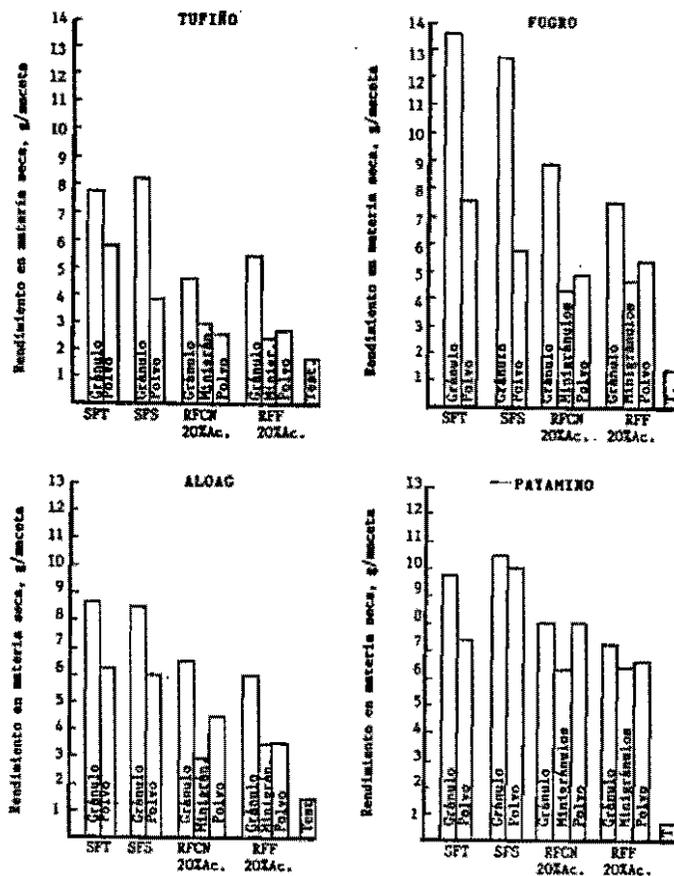


Figura 5. Respuesta a la aplicación de RF parcialmente acidulada en ensayos de invernadero.

### Estudios de Invernadero con Roca Napo (RFN) Parcialmente Acidulada

El efecto positivo de la roca parcialmente acidulada en pruebas preliminares de invernadero y ensayos de campo que serán reportados más adelante, posibilitó el estudio de mecanismo de respuesta a la aplicación de fósforo en suelos derivados de ceniza volcánica, de alto poder de fijación, con RFN parcialmente acidulada proveniente de los yacimientos en la amazonía ecuatoriana. Los resultados de ensayos de campo con RF demuestran que este material compite bien con el SFT y SFS como fuente de P. Por otro lado se ha observado que en suelos de alta capacidad de fijación de P, se continúa obteniendo respuesta a la aplicación de P aún cuando los niveles de P extraídos con  $\text{NaHCO}_3$  habían subido considerablemente después de fuertes aplicaciones de fertilizantes. Esto indicaría que la capacidad de fijación de estos suelos no se satisface fácilmente y que continúan immobilizando P indefinidamente. La aplicación de RFN parcialmente acidulada permitiría usar material más barato para compensar el efecto de la fijación. Bajo las circunstancias descritas se diseñó un ensayo de invernadero con dos suelos volcánicos clasificados como Distrandepts y Eutrandepts con contenidos altos de P extraídos con  $\text{NaHCO}_3$ . La descripción de los suelos se encuentra en el Cuadro 4. En estos suelos se probó el uso de RFN parcialmente acidulada al 25 y 50% en dosis de 150, 300 y 450 kg  $\text{P}_2\text{O}_5$ /ha usando maíz variedad INIAP-180 como planta indicadora.

Cuadro 4. Descripción de los suelos usados en ensayos de invernadero con RFN parcialmente acidulada.

Suelo	Clasificación	pH	P (ppm)	K	Ca Mg Al + H ( meq/100 g suelo)		
					Ca	Mg	Al + H
Santa Catalina	Distrandept	5.2	59	0.29	3.91	0.36	0.42
Alivio Alto	Eutrandept	5.7	40	0.22	5.31	0.96	0.20

Los resultados (Figura 6) indican que el rendimiento en materia seca de los testigos es diferente para los dos suelos: en el suelo Alivio Alto, de menor capacidad de fijación, es mayor que en el suelo Santa Catalina en todos los casos. Ambos suelos están clasificados como Andepts con

producto volcánico como material parental. El uso de RFN parcialmente acidulada no fue tan eficiente como el SFT (no se probó SFS) pero al compararse con el testigo, la respuesta a dosis altas de P es significativa y con la misma tendencia que con el SFT, confirmando así observaciones de experimentos anteriores.

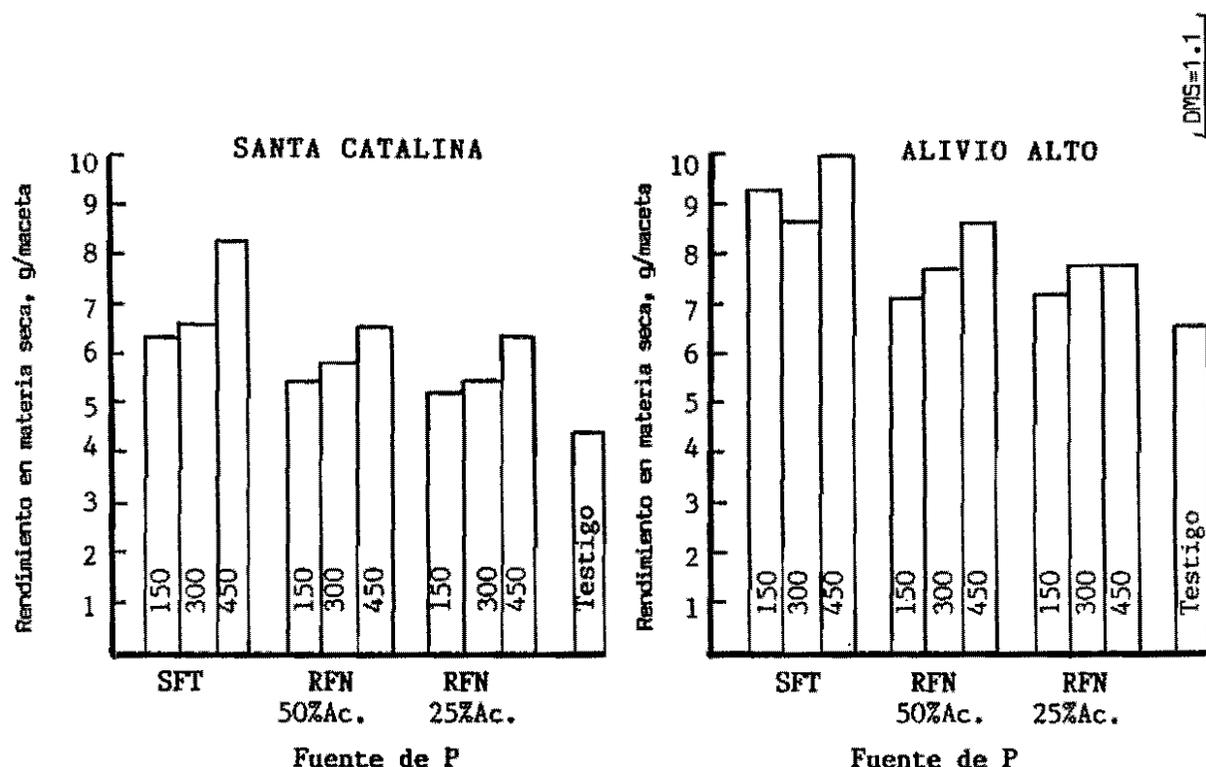


Figura 6. Respuesta a la aplicación de RFN parcialmente acidulada en dos suelos de diferente poder de fijación de P.

La fijación de P en los suelos Andepts estaría relacionada con la cantidad de minerales de rango corto (amorfos) con superficie altamente reactiva. Entre estos minerales se encuentran principalmente la Alofana y la Imogolita que absorben P en grandes cantidades (Parfitt y Henmi, 1980). Por otro lado, la importancia de los complejos Al-humus en la fijación de P en los Andisoles ha sido reportada por diferentes autores japoneses quienes hicieron las siguientes observaciones (Wada, 1980): a) Hay reducción de fijación cuando el suelo es tratado con  $H_2O_2$ , b) Horizontes A de suelos en los cuales la presencia de Alofana e Imogolita es baja fijan altas cantidades de P y hay una alta correlación entre el contenido de humus y la capacidad de fijación de P. El mecanismo estaría relacionado con la cantidad de aluminio con que el humus forma complejos y que reacciona con el  $HPO_4$  y el  $H_2PO_4$  precipitándolos como fosfato de aluminio no cristalino (Nanzyo, 1987).

Otro fenómeno observado fue que aparentemente los suelos Andepts con alto contenido de humus continuarían fijando fósforo indefinidamente. En el Cuadro 5 se observa el efecto de los tratamientos con SFT y RFN parcialmente acidulada sobre la fijación de P después del primer corte de maíz. El ensayo continuará en el invernadero por varios cortes. Altas dosis de P deberían satisfacer la capacidad de fijación, pero esto aparentemente no sucede en suelos de ceniza volcánica con alto contenido de humus (Suelo Santa Catalina) donde parece existir siempre Al activo en el sistema. En el suelo Alivio Alto se observa cierta tendencia a disminuir la cantidad de fósforo fijada con el incremento en los niveles de P (Cuadro 5).

El comportamiento del poder de fijación de estos suelos después de varios cortes y adiciones de P confirmará (o no) la observación anterior.

Los suelos de altura del Ecuador, si bien se derivan de material volcánico, tienen diferente grado de meteorización y contenido de carbono total como consecuencia de la temperatura y la humedad. (Maldonado et al., 1985) En estas condiciones el contenido de humus está controlando la cantidad de P fijado. En la Figura 7 se observa la correlación entre el contenido de carbono total y el fósforo fijado en 42 suelos de la sierra alta del Ecuador. Esta correlación es lineal y altamente significativa.

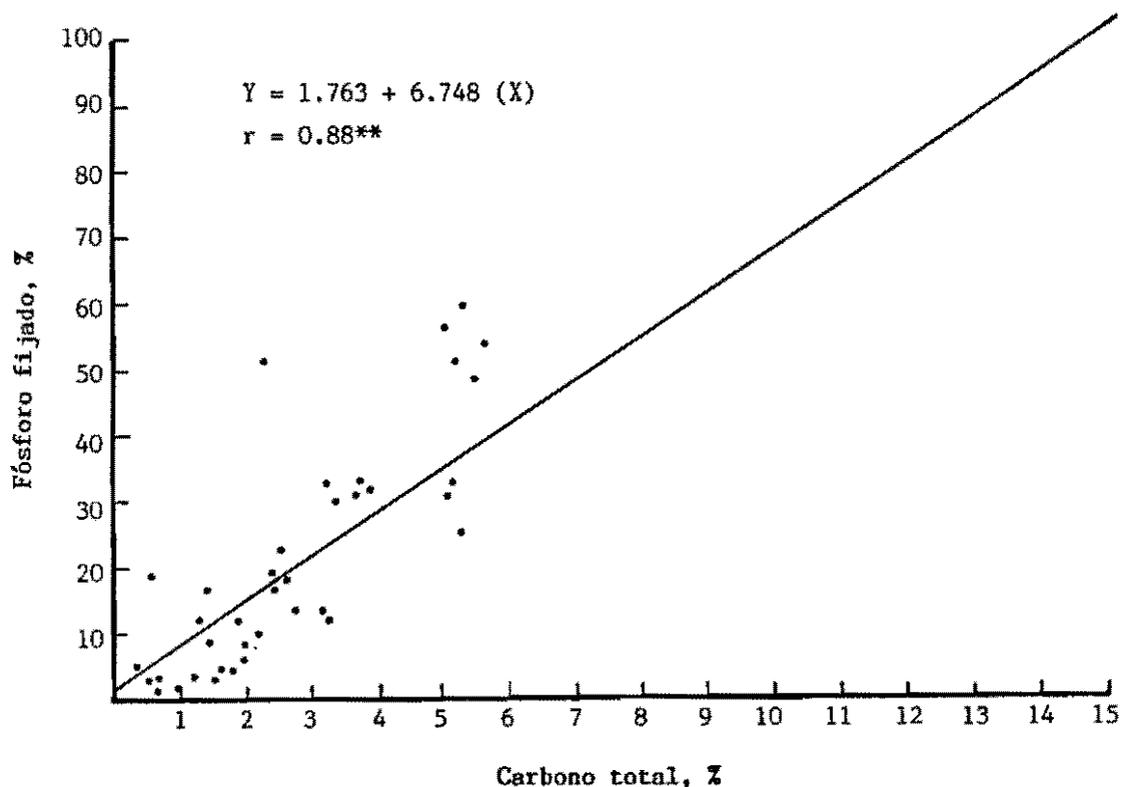


Figura 7. Correlación entre el porcentaje de carbono total y el porcentaje de fijación de fósforo en suelos de la sierra, centro y norte del Ecuador.

Cuadro 5. Efecto de la aplicación de fuentes de P en la subsiguiente fijación de P en suelos de diferente capacidad de fijación.

Fuente	Acidulación (%)	Dosis (kg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> /ha)	Carbono total (%)	Fósforo fijado después del primer corte (%)
Santa Catalina				
RFN	25	150	4.9	43
RFN	25	300	4.9	46
RFN	25	450	5.5	42
RFN	50	150	5.1	46
RFN	50	300	4.9	40
RFN	50	400	5.0	42
SFT	-	100	5.3	40
SFT	-	300	4.9	38
SFT	-	400	5.1	42
Testigo	-	-	5.0	45
Alivio Alto				
RFN	25	150	1.2	12
RFN	25	300	1.1	9
RFN	25	400	1.1	8
RFN	50	150	1.1	11
RFN	50	300	1.0	10
RFN	50	450	1.2	8
SFT	-	150	1.0	11
SFT	-	300	1.2	8
SFT	-	450	1.2	8
Testigo	-	-	1.2	14

## Efectividad Agronomica de Varias Rocas Fosfóricas en ensayos de Campo

### Ensayos con RFF y RFFB

Los ensayos de campo con rocas fosfóricas se iniciaron en 1981 en tres suelos de la sierra alta ecuatoriana, Tufiño, Burgay y Santa Rosa, localizados en las provincias de Carchi, Cañar y Azuay. El suelo Tufiño se clasifica como Distrandept, el Burgay como Criandept y Santa Rosa como Argiudoll. La descripción de estos suelos se observa en el Cuadro 6.

Cuadro 6. Descripción de los suelos utilizados en ensayos de campo con RF en las provincias de Carchi, Cañar y Azuay. Azuay.

Suelo	Clasificación	pH	P	K	Ca	Mg	Al + H
Tufiño	Distrandept	5.5	6	0.76	8.05	1.14	0.80
Burgay	Criandept	5.3	5	0.37	5.00	0.78	1.19
Sta. Rosa	Argiudoll	4.7	5	0.26	3.74	0.78	6.40

En este experimento se evaluaron cuatro fuentes de fósforo que incluyen RFF y RFFB en minigránulos, RFF acidulada al 40% con  $H_2SO_4$  y granulada a tamaño convencional y SFT también granulada a tamaño convencional. Las diferentes fuentes fueron aplicadas en dosis de 88, 132 y 176 kg P/ha. Las RF minigranuladas fueron aplicadas al voleo e incorporadas mientras que la RFF parcialmente acidulada y el superfosfato triple en gránulos convencionales se aplicaron en banda al fondo del surco; esta última práctica es común en papa. Se incluyeron también tratamientos en los cuales se probó una aplicación inicial de 22 kg P/ha de SFT en banda y se completaron las dosis anteriormente indicadas con la aplicación al voleo y la incorporación de RFF y RFFB. Así entonces, los niveles de RF fosfórica fueron 66, 110 y 154 kg P/ha. Finalmente se consideró un tratamiento de 176 kg P/ha de RFF parcialmente acidulada aplicada al voleo e incorporada para compararlo con la aplicación en banda. Las variedades de papa Chola y Santa Catalina, se plantaron en Tufiño y Burgay respectivamente. En Tufiño el ensayo fue replantado con una mezcla de rye grass inglés, italiano,

pasto azul y trébol blanco. Aún cuando los rendimientos fueron relativamente bajos debido a la sequía, (Figura 8) se puede observar que en las dos localidades la aplicación de P en los niveles de 88 y 132 kg P/ha fueron significativamente superiores a los del testigo. El nivel más alto no incrementó el rendimiento. El efecto combinado de todas las fuentes de P en las dos localidades se evaluó utilizando un modelo de la forma  $y = b + m \ln P$  que fuerza todas las curvas de respuesta a un mismo intercepto. El modelo que tuvo alta significación estadística, agrupó las 6 fuentes de P en tres niveles de efectividad que fueron: TST=RFF parcialmente acidulada > (RFF+SFT=RFFo+SFT) > (RFF=RFFB).

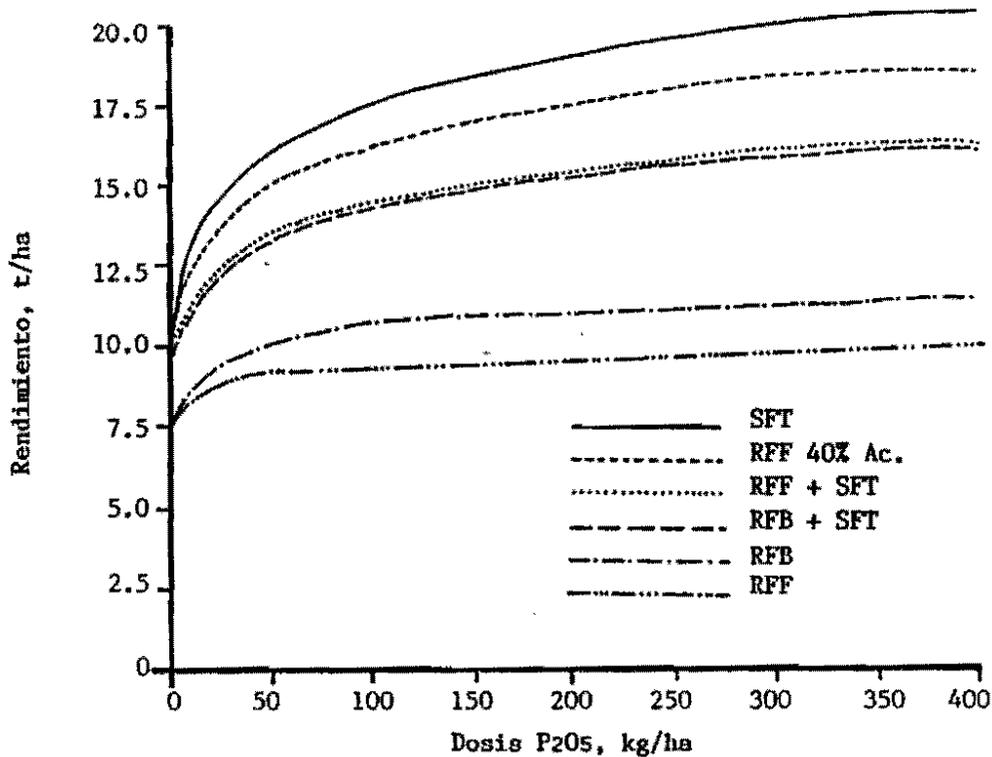


Figura 8. Influencia de las fuentes y dosis de fósforo en el rendimiento del cultivo de papa. Promedio de los ensayos en Tufiño y Burgay.

Estos resultados concuerdan con los de ensayos de invernadero reportados anteriormente. De igual manera, Hammond y León (1983) demostraron que mientras la aplicación directa de RF sin tratamiento fue muy efectiva en Oxisoles y Ultisoles, la roca sin acidulación no causó respuesta en Andepts de alta capacidad de fijación de fósforo. Estos últimos suelos respondieron en cambio a la aplicación de RF con cierto nivel de acidulación. Por otro lado autores como Chien, León y Tejada (1980) y Smyth y Sánchez (1982) encontraron que la RF sin acidulación se disuelve más rápidamente en suelos con alta capacidad de fijación de P,

suponiendo entonces una mayor efectividad agronómica de RF en estas condiciones. Los análisis de suelos realizados después de la cosecha de papa indicaron niveles crecientes de P disponible (Bray I) con el incremento en las dosis de SFT pero no indicaron incrementos con el aumento en las dosis de RF acidulada (Figura 9). Por otro lado el contenido de azufre extraído con fosfato aumentó con el incremento en las dosis de RF acidulada pero no cambió con el de en las dosis de SFT (Figura 10). Esto indicaría que los rendimientos podrían haber sido limitados en cierta forma por una deficiencia de S en los tratamientos con SFT y otras fuentes mientras que la RF acidulada con  $H_2SO_4$  suplementaria este elemento en cantidades adecuadas. Al estudiar el efecto residual de las diferentes fuentes de P, sembrando una mezcla de pasturas después de la cosecha de papas y sin aplicar P nuevamente, se encontró que las parcelas que habían recibido P produjeron rendimientos significativamente más altos que el testigo (Figura 11). Sin embargo la respuesta no fue más allá de el nivel de 38 kg P/ha. Se observó además, que a pesar de la alta solubilidad del SFT y del alto poder de fijación del suelo, este material tuvo la más alta residualidad tanto en el primer corte (Figura 11) como en la evaluación acumulativa de cuatro cortes. El ensayo en el suelo Santa Rosa fue diseñado para evaluar las siguientes fuentes de P: SFT, SFT+RFF y RFF acidulada al 40% con  $H_2SO_4$ , todas en gránulo de tamaño normal y RFF en minigránulos. Las dosis utilizadas fueron 60, 120, 180 kg  $P_2O_5$ /ha. Los materiales fueron aplicados al voleo y luego incorporados para inmediatamente sembrar el rye grass Pichincha. El rendimiento en materia verde en el primer corte, demostró una respuesta significativa a la aplicación de P en todas las dosis de SFT y RFF parcialmente acidulada (Figura 12). Los rendimientos durante 5 cortes sucesivos fueron disminuyendo paulatinamente pero continuaron con la misma tendencia de respuesta que en el primer corte. La media acumulada de 5 cortes se presenta en la Figura 13. En general la aplicación de P en este Mollisol promovió la misma respuesta que en los Andisoles previamente estudiados. Aún cuando este suelo tiene propiedades mollicas, el material parental continúa siendo ceniza volcánica acarreada por el viento desde sitios distantes, lo que hace suponer que éste suelo tiene muy alta capacidad de fijación de P. Se hacen necesarios estudios complementarios que correlacionen el material parental y su estado de desarrollo con la capacidad de retención de P.

#### Ensayos de campo con RF Napo (RFN)

La disponibilidad de RFN permitió iniciar estudios con este material en suelos volcánicos ecuatorianos. Para esto se utilizó un suelo de Huaca clasificado como Distrandept. La caracterización de este suelo se muestra en el Cuadro 7).

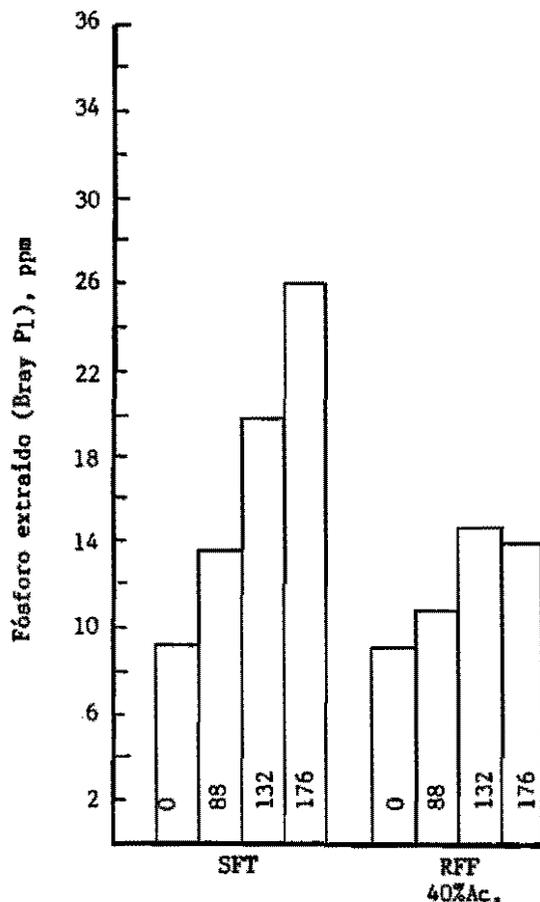


Figura 9. Influencia de la fuente y dosis de P sobre el P extraído con Bray I, después del cultivo de papas.

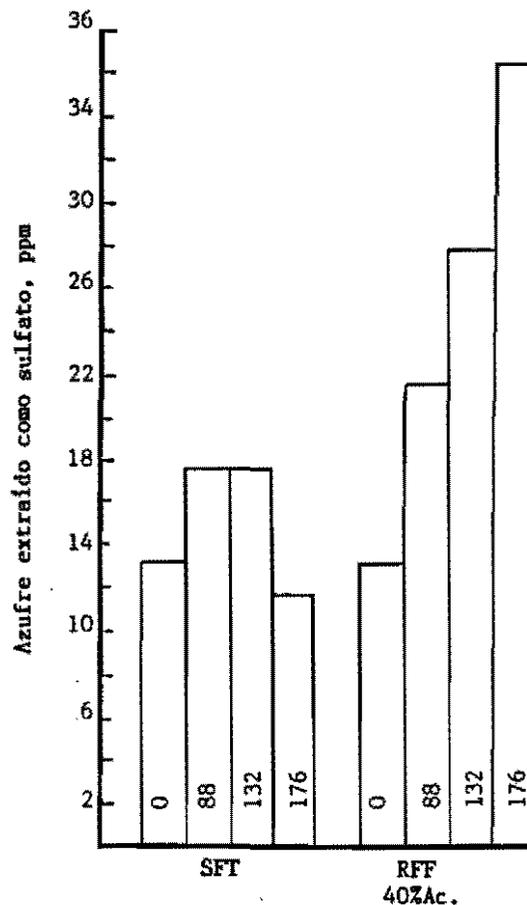


Figura 10. Influencia de la fuente y dosis de P sobre el S extraído después del cultivo de papas.

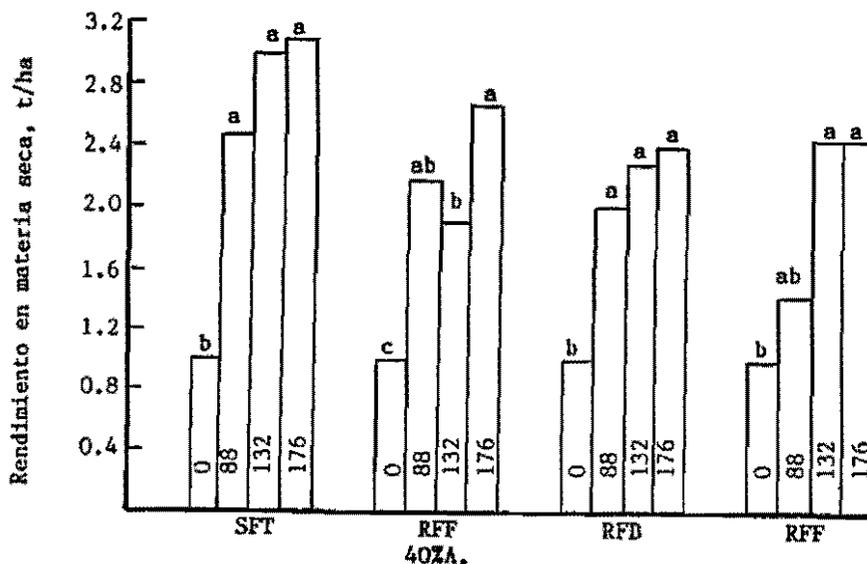


Figura 11. Respuesta de los pastos al P residual, después del cultivo de papa en suelo Burgay (Primer corte). Rendimientos con la misma letra, dentro de cada grupo, no son significativamente diferentes por DMRT ( $\alpha = 0.05$ )

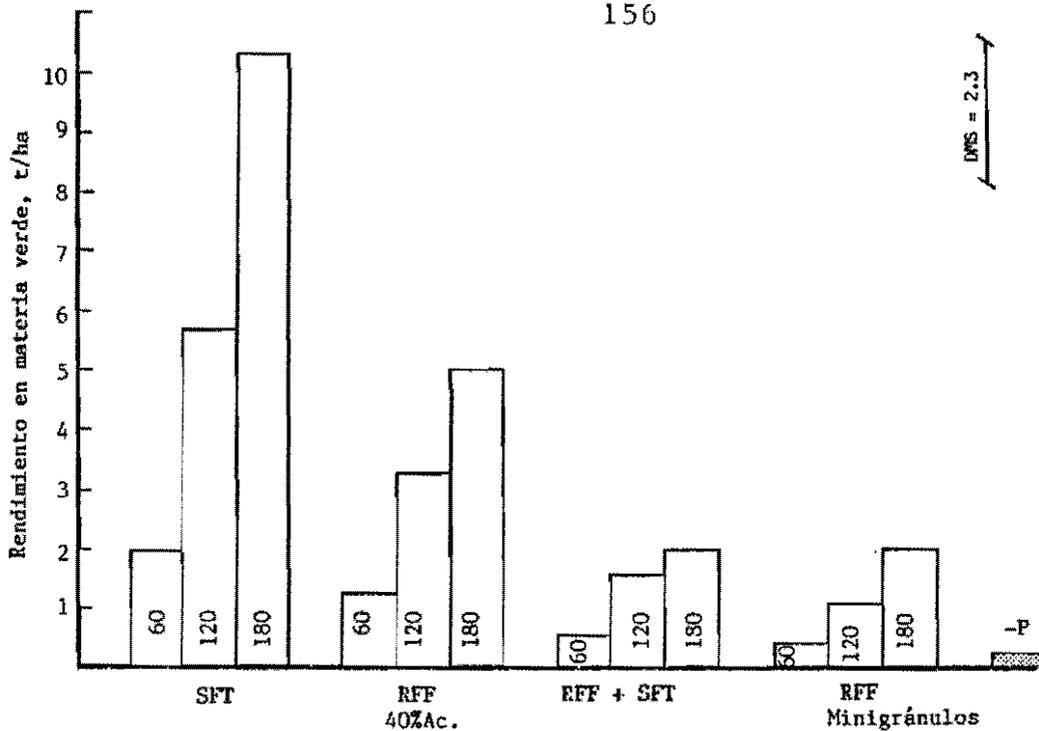


Figura 12. Respuesta del rye grass Pichincha a la aplicación de varias fuentes de P, primer corte. Suelo Santa Rosa.

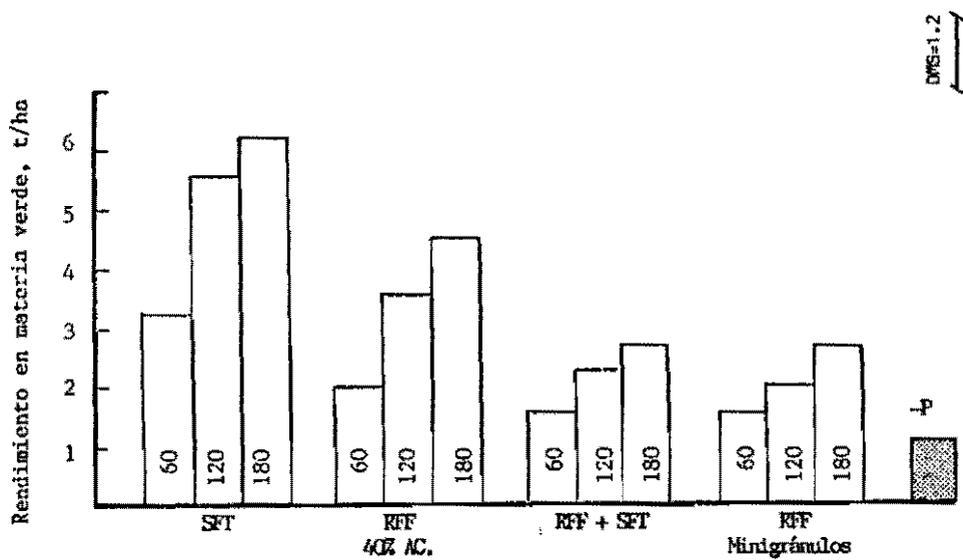


Figura 13. Respuesta del rye grass Pichincha a la aplicación de varias fuentes de P, promedio de cinco cortes. Suelo Santa Rosa.

Cuadro 7. Características del suelo de Huaca utilizado en ensayos con RFN

Suelo	Clasificación	pH	P (ppm)	-----			
				K	Ca	Mg	Al+H
				neq/100 g suelo			
Huaca	Distrandept	5.5	60	0.97	9.52	1.21	0.2

Las fuentes de fósforo utilizadas fueron SFT en granulación normal y RFN, RFF, RFN+S todas en polvo. Los niveles de P usados fueron 150, 300, 450 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/ha. Se utilizó papa variedad Gabriela como cultivo indicador e inmediatamente se estudió el efecto residual con haba (*Faba vicia*). La RFN ha sido clasificada como relativamente insoluble. Los resultados de este experimento (Figura 14) indicaron que el rendimiento de papa con la aplicación de este material fue algo superior al de RFF sin ser esta diferencia significativa. Los rendimientos obtenidos con las dos RF fueron significativamente menores comparados con los del SFT pero fueron significativamente más altos que los del testigo. La adición al suelo de S con la RF no produjo cambio alguno y los resultados fueron iguales a los obtenidos con RF sola. Estos resultados concuerdan con los obtenidos por León y Fenster (1978). Es interesante observar que en suelos con contenido alto de P extraído con NaHCO<sub>3</sub> se encuentra todavía respuesta a la aplicación de P. Esto indica que las recomendaciones de fertilización en Andepts tienen todavía que ser calibradas teniendo en cuenta la fijación de P que parece ser diferente dependiendo del grado de meteorización y acumulación de carbono total. El estudio del efecto residual de las fuentes de fósforo en el cultivo de haba no se encontraron diferencias significativas en el rendimiento. Se observó que todos los materiales produjeron una respuesta mayor a la del testigo aún cuando tampoco esta diferencia fue significativa (Figura 15)

#### Ensayos con RFN parcialmente acidulada

Los resultados alentadores obtenidos con RF parcialmente aciduladas en ensayos previos, incentivó al IFDC/INIAP a probar con RFN acidulada con 25 y 50% de la cantidad de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> necesarios para la obtención de SFS. En este ensayo se evaluaron dosis de 100, 200 y 300 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/ha de RFN acidulada al 25 y 50%, SFT en granulación convencional y RFN en polvo. Este experimento tuvo como cultivo indicador rye grass variedad Pichincha. El suelo Sangolqui clasificado como Hapludoll se describe en el Cuadro B).

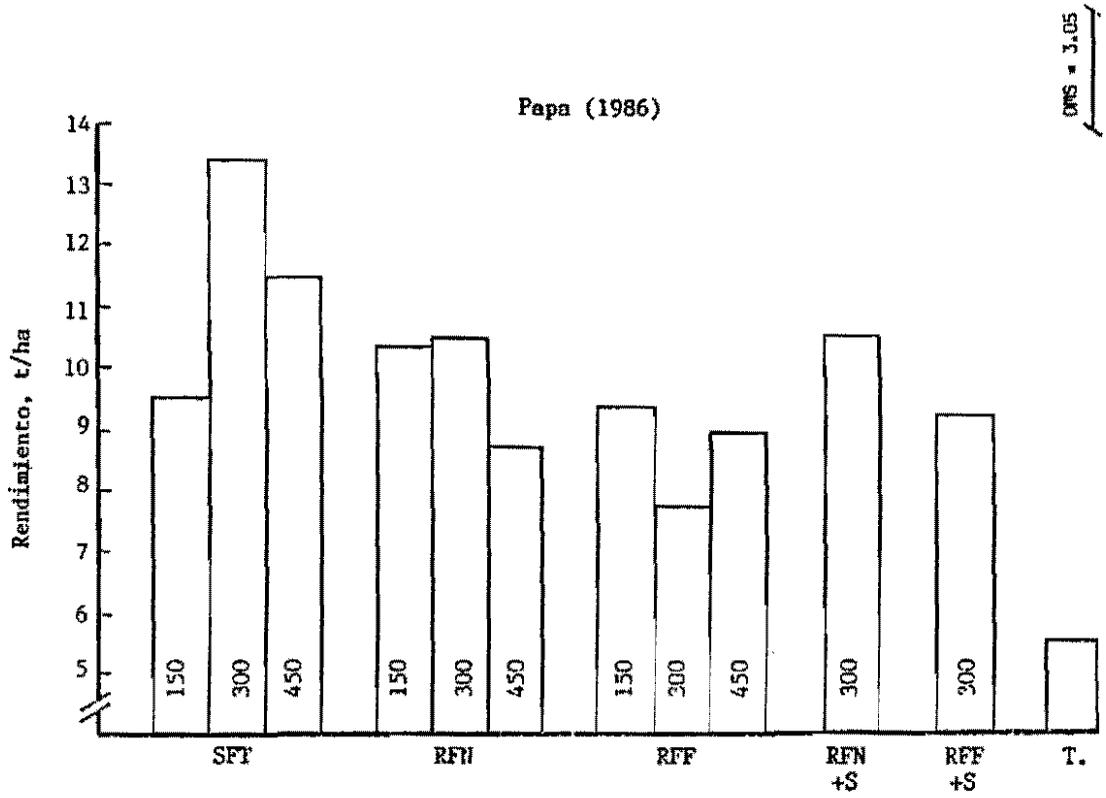


Figura 14. Efecto de diferentes fuentes de P en el rendimiento de papa. Suelo lluaca.

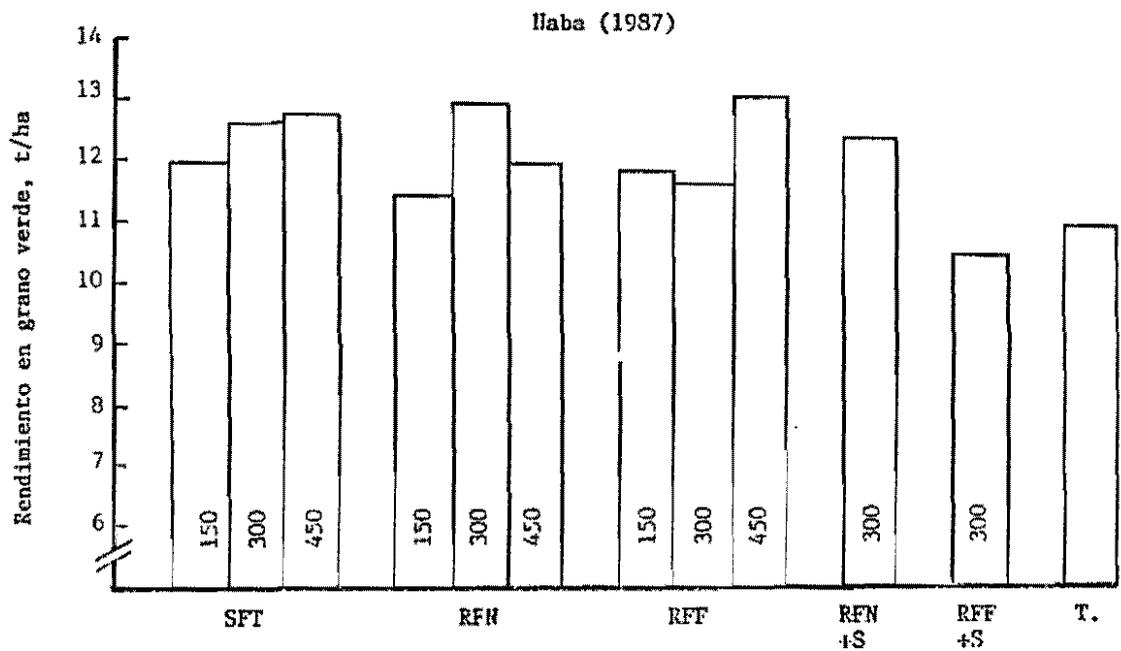


Figura 15. Efecto residual de diferentes fuentes de P en el rendimiento de haba, después de una cosecha de papa. Suelo lluaca.

Cuadro 8. Caracterización del suelo Sangolquí utilizado en ensayos con RFN parcialmente acidulada.

Suelo	Clasificación	pH	P (ppm)	K	Ca	Mg	Al + H
Sangolquí	Hapludoll	6.0	15	0.22	7.0	2.1	-

Los resultados obtenidos con rye grass Pichincha siguen la misma tendencia de los resultados obtenidos en ensayos previos en los cuales se ha utilizado RF parcialmente acidulada (Figura 16). El rendimiento sube con el incremento de P soluble en el material. La RFN acidulada al 25% fue el material que mejor respuesta obtuvo en rendimiento de materia seca aún cuando la diferencia con SFT no fue significativa cuando se comparan cada uno de los niveles individualmente. Por otro lado, la diferencia con la parcela sin P si fue significativa. La RFN acidulada al 50% indujo respuesta menor casi comparable con la RFN en polvo (Figura 16). Este comportamiento no es entendido claramente por el momento. Este suelo, de fondo de valle es un Mollisol, tiene también una alta capacidad de fijación de fósforo (42%) que estaría relacionada con su contenido total de humus y materiales amorfos más meteorizados. Esto explicaría la relativa poca respuesta a los incrementos de P soluble con los aumentos de las dosis de SFT y RF aciduladas.

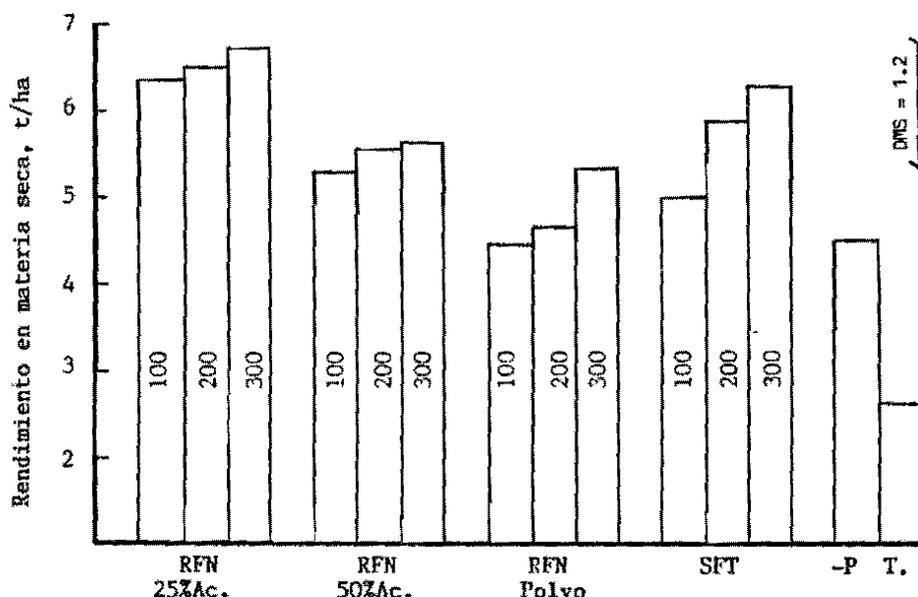


Figura 16. Respuesta de rye grass Pichincha, a la aplicación de RFN parcialmente acidulada en el suelo Sangolquí.

## REFERENCIAS

- Chien, S. and L.L. Hammond. 1978. A comparison of various Laboratory methods for Predicting the Agronomic Potential of Phosphate Rock for Direct Application. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 42:935-939.
- Chien, S.; L.A. León and R. Tejada. 1980. Dissolution of North Carolina Phosphate Rock in Acid Colombian Soils as related to Soil Properties. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 44:1267-1271.
- González, A.; F. Maldonado y L. Mejía. 1986. Memoria explicativa del Mapa General de Suelos del Ecuador. Sociedad Ecuatoriana de la Ciencia del Suelo. Quito-Ecuador.
- Hammond, L.L.; S. Chien and V. Mokwunye. 1986. Agronomic Value of Unacidulated and Partially Acidulated Phosphate Rocks Indigenous to the Tropics. *Advances in Agronomy.* 40:89-140.
- IFDC. 1986. Sulfuric Acid-based Partially Acidulated Phosphate Rock. Its production, cost and use. Muscle Shoals, Al.
- Leon, A. y W.E. Fenster. 1979. Usos potenciales de Rocas Fosfóricas Colombianas en Agricultura. IFDC/CIAT. Cali-Colombia.
- Maldonado, E., et al. 1985. The Volcanic Ash Soils of Ecuador. In F. Beinroth, W. Luzio, F. Maldonado and H. Eswaran (eds). *Proceedings of the Sixth International Soil Classification Workshop. Chile and Ecuador. Part III. Tour guide for Ecuador.* Sociedad Chilena de la Ciencia del Suelo. Santiago, Chile.
- Nanzyo, M. 1987. Phosphate Reactions with Adisols. *Proceedings of the Ninth International Soil Classification Workshop. Tsukuba, Japan. In Press.*
- Parfitt, R. and J. Henmi. 1980. Structure of Allophane from New Zealand. *Clays Clay Minerals.* 28:87-91.
- Smyth, T., and P. Sanchez. 1982. Phosphate Rock Dissolution in Cerrado. Soils as affected by phosphorus sorption capacity. *Soils Sci. Soc. Am. J.* 46:339-345.

## 9. EVALUACION AGRONOMICA DE FERTILIZANTES FOSFATADOS EN LAS ZONAS ALTAS DE SURAMERICA. PERU.

Braulio La Torre\*  
 Alfredo Matos\*  
 Federico Laura\*  
 Hector Ingaroca\*

### RESUMEN

En las zonas altas del Perú, la necesidad de aportar fósforo y otros nutrientes para el desarrollo de cultivos, ha sido conocida desde épocas pre-colombinas, en las que se suministraba guano de islas. Con la disminución de la producción del guano de islas, fue necesario el mayor uso de abonos sintéticos, dándose impulso a la investigación en esta área. El mejor comportamiento de fertilizantes fosfatados solubles (Superfosfato simple, Superfosfato triple) fue demostrado consistentemente. En la década de 1970, la experimentación con roca fosfórica de Bayovar fué en incremento, estableciéndose su uso directo a malla 200 mesh (80%) y mezclada con fosfato soluble en la proporción 50:50 en porcentaje. Actualmente se ha establecido una red de experimentos mediante la cual se evalúa la respuesta de la roca fosfórica de Bayovar malla 100 (55%) y en convenio con el IFDC, se realizan experimentos con roca de Bayovar y de Florida parcialmente aciduladas al 25 y 50%; los resultados señalan comportamientos que permiten colocar estas fuentes de P como alternativas para incrementar la productividad agrícola en suelos ácidos y pobres en fósforo.

### Marco Referencial

En el Perú la agricultura en la sierra se desarrolla en 1.674.000 ha, superficie que representa aproximadamente el 58% del área cultivada. Los niveles tecnológicos utilizados son bajos en general (con excepción de algunos valles como el Mantaro), por lo que se logran rendimientos unitarios bajos.

La producción de cosechas está condicionada a los riesgos climáticos, lo cual constituye uno de los factores más importantes; la temperatura promedio varía de 12 a 16° C y con frecuentes heladas (bajas de temperatura) y sequías, la agricultura se desarrolla en seco, la precipitación va de 400 a 900 mm/año; la época de lluvias se inicia en octubre, el área de agricultura con riego es muy pequeña.

La topografía de la zona andina es muy accidentada, los suelos presentan una morfología desarrollada, en general una baja disponibilidad de nitrógeno y fósforo, así como una

-----  
 \*Director y Técnicos del Proyecto "Uso Agronómico de la Roca Fosfatada de Bayovar" INPA E.F.A. La Molina, Lima, Perú

alta susceptibilidad a la erosión, lo que disminuye su capacidad productiva por la pérdida de suelo y nutrimentos.

Los cultivos más importantes en la región son la papa, el maíz, la cebada, el trigo y la quinua. El cultivo de papa es el de más alta inversión por lo cual los cuidados en su manejo son mayores, y la aplicación de tecnologías como uso de fertilizantes orgánicos y/o sintéticos son cada vez más frecuentes, principalmente en la agricultura desarrollada en los valles interandinos.

La investigación con fertilizantes se desarrolla bajo estas condiciones, y de acuerdo con la disponibilidad de insumos, los cuales han variando con el tiempo. Los cultivos con mayor número de ensayos son la papa, el maíz, y los cereales de grano pequeño.

### Desarrollo de la Investigación en Fertilizantes

La investigación en fertilización se inició en el período 1940-1960, cuando se evaluaron dosis de guano de islas con o sin complemento de fertilizantes sintéticos (Apéndices 1 y 2).

Entre 1960 y 1966, se evaluaron fuentes, dosis, épocas y localización de fertilizantes sintéticos.

Entre 1966 y 1969, se correlacionaron métodos analíticos y se logró el ajuste de fuentes y dosis de fertilizantes sintéticos (McCollum y Valverde, 1968).

Entre 1974 y 1979, se evaluó el efecto residual de fuentes y dosis de fertilización en sistemas de rotación de cultivos.

Entre 1979 y 1982, se estudió el control de la toxicidad del aluminio mediante el uso de cal, roca fosfotada, variedades y sus combinaciones.

Actualmente se está evaluando la acción de la roca fosfórica de Bayovar de finura 50% pasa malla 100 y el efecto de la acidulación parcial de la roca fosfórica.

En el primer período los resultados de la experimentación estuvieron enmarcados por los efectos del guano de islas o estiércol; a pesar de la falta de información del clima y de las características de los suelos que ayudarán a un mejor análisis de los resultados, las siguientes conclusiones son importantes:

- Los fertilizantes sintéticos tuvieron efectos similares o superiores al guano de islas o estiércol, debido fundamentalmente a la mineralización de la materia orgánica, que en los suelos de la sierra es lenta por el clima frío y la acidez de los suelos.

- El nitrógeno y el fósforo son elementos importantes en la productividad agrícola de la sierra, por la respuesta consistente y significativa de los cultivos a su aplicación.

En el Cuadro 1 se muestra la respuesta al fósforo aplicado como guano de islas comparado con el superfosfato; a una dosis equivalente se aprecia apenas una ligera superioridad del superfosfato.

Cuadro 1. Respuesta de la papa al fósforo de fuentes minerales y orgánicas, en cuatro lugares en la sierra (Campaña Agrícola 1959-60) (McCollum y Valverde, 1967).

Localidad	Rendimiento, t/ha		
	Fuente de fósforo		
	Superfosfato	Guano de islas	Sin fósforo
Junín	24.5	23.6	22.4
Cuzco	24.6	22.2	23.3
Huaraz	29.8	27.9	20.7
Tarma	18.9	16.2	7.0

Desde 1960 se desarrolla el programa de fertilidad del suelo, con base en la información generada en el primer período, los esfuerzos se dedicaron casi exclusivamente a tres tipos de experimentos:

- Ensayos factoriales NPK en combinación completa.
- Ensayos de dosis de fertilizantes, densidad de siembra y variedades.
- Evaluación de fuentes de nitrógeno y fósforo.

Luego de establecida una red de experimentos a nivel nacional y después de cuatro años de experimentación las conclusiones fueron las siguientes:

- Se encontraron incrementos positivos del rendimiento hasta el límite máximo de las dosis aplicadas (160 kg/ha) tanto de nitrógeno como de fósforo.

- De las fuentes de fósforo, las solubles fueron consistentemente superiores a las fuentes menos solubles (Fosfato Thomas, Hiperfosfato), aún en condiciones de los suelos ácidos.
- Las respuestas a la aplicación de fósforo estuvo relacionada con el fósforo extractable (Olsen) y el pH del suelo. Las mayores respuestas se obtuvieron en suelos bajos en fósforo y de alta acidez.

Cuadro 2. Respuesta de la papa al fósforo aplicado, con relación al fósforo disponible (Olsen) y el pH del suelo. McCollum y Valverde, 1968.

pH	Nivel de fósforo del suelo (ppm)		
	Bajo < 7	Medio 7-15	Alto > 15
	100 (testigo)*		
< 5.5	207 (3) <sup>b</sup>	-	146 (4)
5.5-6.5	113 (1)	122 (2)	108 (5)
6.5-7.5	154 (7)	108 (2)	-
> 7.5	145 (2)	-	-

\* Tratamiento testigo (150-0-75 ó 160-0-80)

<sup>b</sup> Los números en paréntesis se refieren al número de ensayos para cada promedio.

De esta forma se estableció la importancia y la necesidad de los análisis del suelo para la recomendación de dosis de fertilizantes.

En esta etapa de la investigación se recomendaron estudios adicionales para establecer correlaciones más estrechas entre los contenidos de nutrimentos del suelo y la respuesta a los fertilizantes aplicados para hacer con base en el análisis de suelo recomendaciones más confiables. También se recomendó la exploración experimental más allá de los niveles estudiados (80-160 kg/ha de N; 80-160 kg/ha de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>).

En la década del 70 la experimentación con roca fosfórica de Bayovar fue en aumento (Cano y Davelouis, 1978). Se realizaron ensayos en siete localidades cuyos pH y

contenidos de fósforo aparecen en el Cuadro 3. En los Cuadros 4 y 5 se observa la alta respuesta a la aplicación de fósforo en los suelos en estudio. En el Cuadro 5 se observa en dos ensayos el efecto residual de las dos fuentes de P. Se notó que la roca fosfórica supera al superfosfato simple aún en la dosis baja.

Cuadro 3. Fósforo disponible (ppm) y pH de los suelos donde se evaluó la roca fosfórica Bayovar (Cano y Davelouis, 1978).

Lugar - Suelo	P disponible (ppm)	pH
Porcen km 18, Cajamarca	4.0	5.5
Porcen km 12	7.0	5.6
Porcen km 17	5.0	5.3
Porcen km 16	4.0	5.3
Chota	3.0	5.2
Sta. Rosa de Ocopo, Junín	6.0	6.8
Porcen km 12, Junín	7.0	5.6

Cuadro 4. Efecto en el rendimiento de la papa (t/ha) de la roca fosfórica Bayovar y el Superfosfato simple (Cano y Davelouis, 1978).

Lugar	Roca fosfórica Bayovar (kg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> /ha)			Superfosfato simple (kg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> /ha)
	150	300	450	150
Porcen km 18, Cajamarca	5.40	7.06	7.19	9.29
Porcen km 12	1.21	4.69	2.96	5.75
Porcen km 17	7.34	9.34	10.84	10.27
Porcen km 16	4.53	6.90	6.10	5.18
Chota	3.86	1.64	4.37	4.17
Sta. Rosa de Ocopo, Junín	3.21	2.14	2.92	6.28
Promedio	4.25	5.29	5.73	6.82

Cuadro 5. Efecto residual de dos fuentes de P en el rendimiento de la papa (t/ha) en dos suelos donde se habían aplicado a un cultivo de papa anterior (Cano y Davelouis, 1978).

Lugar	Roca fosfórica Bayovar (kg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> /ha)			Superfosfato simple (kg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> /ha)
	150	300	450	150
Porcen km 18, Cajamarca	1.54	6.78	6.08	1.33
Sta. Rosa de Ocupo, Junín	7.00	8.10	7.00	6.30
Promedio	4.27	7.44	6.54	3.81

En el Cuadro 6 se observa el comportamiento de la roca fosfórica Bayovar y el superfosfato simple desde el punto de vista de su efectividad agronómica o valor agronómico. En cinco de los ocho ensayos el valor agronómico de la roca fosfórica Bayovar es mayor del 70% lo cual crea la posibilidad de uso directo como fuente de P. El valor agronómico fue más alto cuanto más bajo era el pH.

En experimentos realizados con trigo se concluyó que no se debía recomendar la aplicación de fósforo en ninguna de las fuentes evaluadas, principalmente por la casi nula respuesta del cultivo y su condición de ser secundario en la rotación.

Ensayos posteriores, incluyendo roca fosfórica de Bayovar se señala que los suelos de sierra responden más espectacularmente a la fertilización fosfatada (Cuadro 7).

Entre los fosfatos naturales, los de Bayovar tuvieron un mejor comportamiento, siendo el fosfato de Bayovar o de Cabecera el de mejor comportamiento, debido posiblemente a su contenido de otros nutrimentos (potasio, magnesio y microelementos) y su estructura de naturaleza suave (Buitrón, 1976).

Cuadro 6. Incremento en el rendimiento, eficiencia productiva (kg de papa por kg de  $P_{2}O_{5}$ ) y valor agronómico de dos fuentes de P (Cano y Davelouis, 1978).

Lugar	Tratamiento 150 kg $P_{2}O_{5}$ /ha	Incremento en el		
		rendimiento (t/ha)	kg de papa/kg de $P_{2}O_{5}$	Valor agronómico
Porcen km 18	FB*	5.04	34	54.8
Cajamarca	SS	9.31	62	-
Porcen km 12	FB	1.21	8	21.1
	SS	5.75	38	-
Porcen km 17	FB	7.34	49	72.1
	SS	10.27	68	-
Porcen km 16	FB	4.53	30	85.7
	SS	5.18	35	-
Chota	FB	3.86	26	92.9
	SS	4.17	28	-
Sta. Rosa de Ocopo	FB	2.12	14	66.6
Junin	SS	3.21	21	-
Porcen km 12	FB	1.54	10	111.1
	SS	1.33	9	-
Sta. Rosa de Ocopo	FB	7.00	46	109.0
Junin	SS	6.30	42	-

\* FB = roca fosfórica Bayovar; SS = superfosfato simple.

Cuadro 7. Resumen del efecto de siete fuentes fosfatadas de diferente grado de solubilidad sobre el rendimiento promedio (t/ha) de papa empleando la fórmula 160-160-80 en diversos tipos de suelos de la sierra del Perú. (Villagarcía y Meyer, 1978).

Localidad	Suelo		Testigo		Fertilizantes fosfatados 160 kg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> /ha						
	pH	P (ppm)	Sin NPK	Sin P con NK	Roca fosf. Florida 32%	Roca Bruta Bayovar 20%	Roca Conc. Bayovar 30%	Mezcla (50:50) Roca Bruta y Supersimple	S. Fost. simple 20%	S. Fost. triple 45%	Fost. Diamonico 18-45-0
La Libertad Junín	4.9	5.0	4.9	9.4	--	14.2	--	16.6	15.1	--	--
Huandobamba Huánuco	5.8	1.4	-	7.8	--	19.6	--	19.5	19.9	19.6	--
Sta. Rosa de Ocupo-Junín	7.2	11.0	8.5	13.5	--	25.1	--	33.6	31.7	32.8	--
Sta. Rosa de Ocupo-Junín	6.7	11.4	9.9	13.4	--	25.8	--	31.6	33.9	32.3	--
Zurite Anta Cusco	6.2	13.6	3.2	10.8	--	13.1	--	14.8	15.1	14.4	--
Sta. Rosa de Ocupo-Junín	5.7	2.7	9.4	15.8	21.2	26.9	25.3	30.8	32.2	32.7	30.0
Sta. Rosa de Ocupo-Junín	5.7	2.7	9.7	17.0	--	--	--	--	30.6	--	--
Zurite Anta Cusco	6.7	10.0	6.4	16.0	15.3	19.8	17.5	--	21.0	17.0	18.7

La aplicación en mezclas de roca bruta de Bayovar con supersimple (relación 1:1) tuvo un comportamiento similar a los superfosfatos, este hecho es explicable porque los fosfatos solubles pueden servir como fósforo de iniciación, para los menos solubles, ya que el desarrollo inicial de un abundante sistema radical favorece el mejor aprovechamiento de la roca.

La roca fosfatada en suelos ácidos tuvo mayor respuesta, aunque en suelos neutros o alcalinos, la aplicación de roca bruta de Bayovar produjo incrementos que fluctuaron entre el 50 y 100% con respecto al testigo sin fósforo.

En este período se realizaron evaluaciones del elemento fósforo en combinación con nitrógeno y potasio, mediante ensayos factoriales NPK (Cuadro 8).

En los experimentos se encontró respuestas positivas al fósforo, las cuales estuvieron relacionadas no solo con el fósforo extractable del suelo sino también con el pH. Las mejores respuestas fueron obtenidas en suelos bajos en fósforo y con pH ácido.

En estudios realizados en el cultivo de maíz la respuesta al fósforo es limitada, con cultivares locales su efecto es pequeño o nulo, con cultivares mejorados o híbridos la respuesta a la fertilización es mayor, así se obtienen las mejores cosechas de maíz con niveles de 40, 90 y hasta 120 unidades de  $P_2O_5$  (Sevilla et al., 1975; Benites J., 1975).

Durante la última década se intensificó el estudio de la eficiencia de uso del fertilizante fosfatado, controlando la toxicidad del aluminio mediante el encalado y la aplicación de roca fosfórica, resultando más eficiente los fertilizantes solubles, cuando se elimina el contenido de aluminio cambiante en el suelo. Aún se continúa con este tipo de investigación.

Actualmente se evalúa el efecto de la roca fosfatada de Bayovar con granulometría (55% para malla 100) mediante un convenio entre Minero Perú, INIFA y ENCI.

En el Cuadro 9 se presentan algunos resultados de la última campaña agrícola, donde se aprecia el efecto benéfico de la fertilización fosfatada, el superfosfato triple fue más eficiente que la roca fosfórica de Bayovar, aunque su aplicación produjo incrementos considerables respecto del testigo. En la campaña siguiente se evaluó el efecto residual de los ensayos señalados (Cuadro 10).

Aunque en períodos anteriores se evaluaron mezclas de fuentes de fósforo solubles y no solubles, lo cual semejó condiciones de acidulación parcial, actualmente se viene evaluando roca fosfórica parcialmente acidulada al 25 y 50%.

Cuadro B. Respuesta al fósforo en ensayos factoriales NPK en el cultivo de papa en diferentes localidades de la Sierra Peruana. (Villagarcía, 1983).

Localidad	Rendimiento, t/ha				Suelo	
	Fórmula de abonamiento				pH	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (ppm)
	0-0-0	150-0-150	150-75-150	150-150-150		
Concepción-Junín	7.8	22.8	16.9	20.5	6.6	24.0
Anta-Cusco	7.4	22.6	19.7	20.8	6.0	9.2
Casablanca-Tarma	6.4	10.9	17.6	19.4	4.6	19.0
Maras-Cusco	8.2	11.6	27.5	31.8	7.0	5.0
Palian-Junín	3.8	13.4	16.3	15.6	7.0	90.0
Orcotuna-Junín	7.8	18.3	23.8	24.6	6.0	18.0
La Mejorada-Huancavelica	6.0	18.0	19.9	20.4	5.7	119.0
Casablanca-Tarma	3.2	4.2	15.1	22.2	4.4	14.0
Huanta-Ayacucho	3.9	2.8	16.8	19.8	4.4	19.0
San Lorenzo-Junín	9.4	8.9	12.5	16.3	7.1	46.0
Taabo-Huanuco	4.0	12.8	11.8	15.4	6.4	74.0
Casablanca-Tarma	12.9	7.0	17.9	23.5	4.0	118.0
Lucana-Ayacucho	7.9	8.9	20.1	22.6	4.5	113.3
Camacani-Puno	13.7	20.8	19.8	17.2	6.4	6.0
Maras-Cusco	6.6	13.0	33.0	38.2	-	-
Quispicucho	13.8	18.4	19.7	20.3	-	-

Cuadro 9. Rendimiento del cultivo de papa por efecto de la aplicación de RFB y SFT, comparados con el testigo (0-0-0-NPK) en diferentes localidades del Perú. Campaña 1986-1987.

Lugar	Testigo <sup>a</sup>	Roca fosfórica de Bayovar <sup>b</sup>		Superfosfato triple		N-0-K <sup>c</sup>	
	Rend. (t/ha)	Rend. (t/ha)	Increment. (%)	Rend. (t/ha)	Increment. (%)	Rend. (t/ha)	Increment. (%)
Cajamarca	6.20	12.33 (250) <sup>d</sup>	98.87	16.40 (100)	164.52	11.29	82.09
La Libertad							
1	2.85	8.35 (150)	192.98	11.95 (250)	319.29	8.43	195.78
2	3.25	7.85 (250)	141.54	9.69 (250)	198.15	4.63	42.46
3	5.58	11.67 (200)	109.14	18.76 (200)	236.20	11.15	99.82
Junín							
1	13.22	19.97 (300)	51.06	33.37 (150)	152.42	17.22	30.26
2	7.0	9.53 (300)	36.14	21.73 (150)	210.43	13.47	92.43
3	1.63	5.02 (300)	207.98	11.37 (250)	597.55	1.15	29.45
Ayacucho	2.61	7.82 (150)	199.62	17.01 (200)	551.72	2.60	0.38
Cuzco							
1	13.34	21.30 (375)	59.67	28.66 (150)	114.84	14.78	10.79
2	4.4	13.04 (375)	196.36	17.24 (250)	291.82	7.30	65.91
3	6.04	9.66 (375)	59.93	14.25 (200)	135.93	9.15	51.49

<sup>a</sup> El testigo, base de comparación, no recibió ninguna aplicación NPK.

<sup>b</sup> Los tratamientos con Roca Fosfórica de Bayovar (RFB) y de Superfosfato triple (SFT), recibieron además 120-100 unidades de NK.

<sup>c</sup> N-0-K, se aplicó 120-0-100 de NPK.

<sup>d</sup> ( ) Unidades de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> con más altos rendimientos.

Cuadro 10. Rendimiento de cereales (maíz y trigo) por efecto residual de la aplicación de Roca fosfórica Bayovar (RFB) y Superfosfato triple (SFT), comparados con el testigo (0-0-0) en diferentes localidades del Perú. Campaña 1986-1987.

Tratamiento	Maíz				Trigo	
	Cajamarca		La Libertad		Cajamarca	
	Rendimiento (t/ha)	Incremento (%)	Rend. (t/ha)	Increment. (%)	Rend. (t/ha)	Increment. (%)
Testigo (0-0-0)	1.46		2.0		1.26	
N - D - K	3.16 <sup>a</sup>	116.4	3.7 <sup>b</sup>	85	1.59	26.19
RFB	3.40 (90) <sup>c</sup>	132.88	4.04 (120)	102.0	1.90 (225)	50.79
SFTC	3.27 (90)	123.97	4.02 (30)	101.0	1.90 (60)	50.79

<sup>a</sup> Dosis N-D-K: 90-0-90.

<sup>b</sup> Dosis N-D-K: 120-0-40.

<sup>c</sup> ( ) Unidades de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> con más altos rendimientos.

Este proyecto de investigación se viene realizando a través del convenio existente con el IFDC, fundamentalmente en Puno, Junín y Lima.

El Cuadro 11 presenta los rendimientos de cebada como respuesta a diferentes fuentes y grados de acidulación. El efecto de la fertilización fosfatada es muy ligero, pero la tendencia es positiva, la respuesta a la roca de Bayovar al 25% de acidulación es similar a la respuesta del superfosfato triple.

Cuadro 11. Efecto de diferentes grados de acidulación de la roca fosfórica en el rendimiento de la cebada.

Tratamiento	Rendimiento, (t/ha)
Roca de Bayovar	
25% de acidulación	3.04
50% de acidulación	2.89
Roca Florida	
50% de acidulación	2.74
Roca Fosfatada concentrada	2.70
Superfosfato triple	3.04
Testigo 0-0-0	2.42

Dosis 80-80-40.

Responsable Ing. Héctor Ingaroca.

## REFERENCIAS

- Benites, J.R. 1975. Funciones de Producción y óptimo económico para el nitrógeno y fósforo en el cultivo de maíz. Tesis Magister Scientiae UNA La Molina.
- Buitrón, F. 1976. Evaluación Biológica de la Roca Bruta de Bayovar aplicada sola y en mezcla (50:50) con supersimple en papa. Tesis Ing. Agr. UNA La Molina.
- Cano, O.M. y Davelouis, Mc.J. 1978. Efectividad agronómica y económica del Fosfayovar como fuente de fósforo y perspectivas para su uso. Lima, Perú.
- López M., R. 1986. Bibliografía anotada de fósforo en el Perú 1963-1985. INIPA-Misión Universidad Estatal de Carolina del Norte.
- McCollum, E. y Valverde, C. 1967. Fertilización del cultivo de la papa en el Perú. Ministerio de Agricultura Boletín No. 17. EEA La Molina.
- McCollum, R. y Valverde, C. 1968. The fertilization of potatoes in Perú. 1959-1964 North Carolina Agricultural Experiment Station. Tech. Bul. No. 185.
- Rojas S., W. 1975. Evaluación Biológica de la Roca Bruta Bayovar sin o con superfosfato simple y la materia orgánica. Tesis Ing. Agr. UNA La Molina.
- Sevilla P.R., et al. 1975. Respuesta a la fertilización de cultivares de maíz de sierra, diferente precocidad, heterogeneidad y adaptación.
- Villagarcía H.S. y Meyer, R. 1978. Nutrición Fosfatada Resultados de Ensayos de Invernadero y de Campo sobre fertilización y nutrición mineral en el cultivo de papa. Período 1975/1977. UNA-CIF. Agosto.
- Villagarcía H.S. 1983. La fertilización del cultivo de la papa en el Perú. UNA-CIF.

## APENDICE 1

Respuesta a la aplicación de estiércol en presencia y ausencia de fertilizantes.

Lugar	Sin estiércol Sin fertili.	5 t de estiércol Sin fertili.	5 t de estiércol 150-150-75	Propiedades del suelo			
				pH	NO (%)	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (kg/ha)	K <sub>2</sub> O (kg/ha)
Junín (Mantaro)	18.0	20.9	27.7	7.6	1.5	120	10
Cusco (Perayoc)	17.8	19.3	30.5	7.6	2.8	150	15
Ancash (Catac)	6.9	17.6	35.5	4.6	5.5	350	8
Tarma (Casablanca)	--	7.1	23.4	4.3	3.7	100	18

## APENDICE 2

Respuesta a la aplicación de 560 kg/ha de Guano de Islas (12-8-1) vs. fertilizante sintético en el cultivo de papa.

Fecha y lugar	Rendimiento, t/ha		
	Testigo (0-0-0)	Guano de islas (67-45-6)	Fertilizante sintético (100-100-60)
1958/59			
Junín (Casablanca)	10.5	13.8	19.4
Junín (Jauja)	7.7	11.9	14.9
Cuzco (Tio)	19.6	21.4	26.8
Puno (Camacani)	7.2	8.6	10.3
Huánuco (Sonobamba)	24.3	22.9	24.2
Cajamarca	1.4	5.0	3.6
Ancash	7.6	11.2	15.5
1959/60			
Junín (Jauja)	7.1	8.6	12.7
Puno (Camacani)	3.6	3.8	4.0
Huánuco	9.7	13.3	13.2
Ancash	5.4	9.0	15.9
Apurímac (Andahuaylas)	11.6	14.8	15.4
Ayacucho (Huanta)	4.3	8.4	10.6
Arequipa (Vallecito)	5.8	7.9	8.7

## 10. EVALUACION AGRONOMICA DE FERTILIZANTES FOSFATADOS EN VENEZUELA

Eduardo Casanova\*

### RESUMEN

Todo el fertilizante fosfatado que se usa en Venezuela, es importado. Para 1987 las ventas totales fueron de  $1250 \times 10^3$  toneladas. Venezuela cuenta con una serie de depósitos naturales de rocas fosfóricas tales como Lobatera y San Pedro del Río en el Estado Táchira, Riecito y Lizardo en el Estado Falcón, Chiquará y Jali en el Estado Mérida y un nuevo depósito de 80 km de longitud desde Los Hernández en el Estado Trujillo hasta La Azulita en el Estado Mérida. Al comparar las reservas de rocas fosfóricas venezolanas, sin incluir el eje Los Hernández - La Azulita, con las estimaciones de fósforo para la fertilización de los pastos y alimentación animal (200,000 toneladas/año), se puede concluir que estos depósitos podrían satisfacer esos requerimientos durante los próximos 700 años, lo cual representa una alternativa parcial a la salida de divisas del país por importación de fertilizantes fosforados de alta solubilidad. Este trabajo presenta los resultados de la evaluación agronómica realizada a los diferentes depósitos naturales de rocas fosfóricas en el país, su posible utilización en combinación con escorias básicas producto de la industria del acero, su caracterización química y mineralógica y algunos resultados de la eficiencia agronómica de estas fuentes fosforadas naturales y tratadas químicamente con el fin de aumentar la solubilidad y finalmente algunas alternativas del uso de estos depósitos a mediano plazo.

### Introducción

Todo el fertilizante fosforado que se usa en Venezuela es importado. El fósforo junto con el potasio constituyen insumos estratégicos, por lo que se mantiene un estado de dependencia de la agricultura venezolana en función de esos nutrimentos. Los dos fertilizantes fosforados que más se importan son: el Fosfato Diamónico y el Superfosfato Triple, cuyas ventas en 1987 están estimadas en  $125 \times 10^3$  y  $31 \times 10^3$  toneladas, respectivamente. Si se combinan estas cantidades con las ventas de fórmulas completas granuladas, cuyas fuentes de fósforo son los productos simples antes

---

\*Coordinador de Investigaciones de la Facultad de Agronomía de la Universidad Central de Venezuela, Maracay, Aragua, Apartado Postal 4579, Venezuela

mencionados, se obtiene una cantidad de ventas totales para 1987 de  $1250 \times 10^3$  toneladas. Esto explica el por qué se considera a estos insumos agrícolas como estratégicos.

Además de la condición estratégica del fertilizante, hay que agregar que este insumo en Venezuela está subsidiado por el Estado, y que esta política ha sido muy cambiante en el tiempo como lo explican los siguientes hechos:

- a) En Marzo de 1981, el Ejecutivo Nacional decidió eliminar el subsidio a los fertilizantes, estableciendo como precio de venta el que prevalecía en ese momento en el mercado internacional.
- b) En Octubre de 1982, se disminuyó el precio de venta de los fertilizantes a los agricultores en aproximadamente un 15%.
- c) En Marzo de 1984, el Ejecutivo Nacional, rebaja el precio de los fertilizantes en un 50% con respecto a los vigentes para ese momento, y así se ha mantenido hasta ahora.

De las cantidades de ventas totales de fertilizantes para 1987, sólo la mitad fue pagada por los agricultores y la otra mitad por el Ejecutivo Nacional.

En este trabajo se presentan: los resultados de la evaluación agronómica realizada a los diferentes depósitos naturales de rocas fosfóricas en el país; su posible utilización en combinación con escorias básicas producto de la industria del acero; su caracterización química y mineralógica; algunos resultados de la eficiencia agronómica de estas fuentes fosforadas naturales crudas y tratadas químicamente para aumentar su solubilidad, y finalmente, algunas alternativas del uso de estos depósitos a mediano plazo.

### Las Rocas Fosfóricas Venezolanas

Venezuela cuenta con una serie de depósitos naturales de rocas fosfóricas (Figura 1), tales como: a) "Lobatera" en el Estado Táchira con 95.278 toneladas de reservas probadas y 250.000 toneladas de reservas posibles, b) "Riecito" en el Estado Falcón, cuyas reservas se estiman en 21 millones de toneladas, c) "Lizardo" en Estado Falcón, con reservas de 18.5 millones de toneladas y d) "Chiguara" un nuevo yacimiento descubierto en el Estado Mérida, con reservas de 30 millones de toneladas. Recientemente (1986), se han localizado dos nuevos yacimientos en San Pedro del Río (Estado Táchira) con reservas probadas de 50 millones de toneladas y una faja que se extiende por más de 80 km desde Los Hernández en el Estado Trujillo hasta La Azulita en el

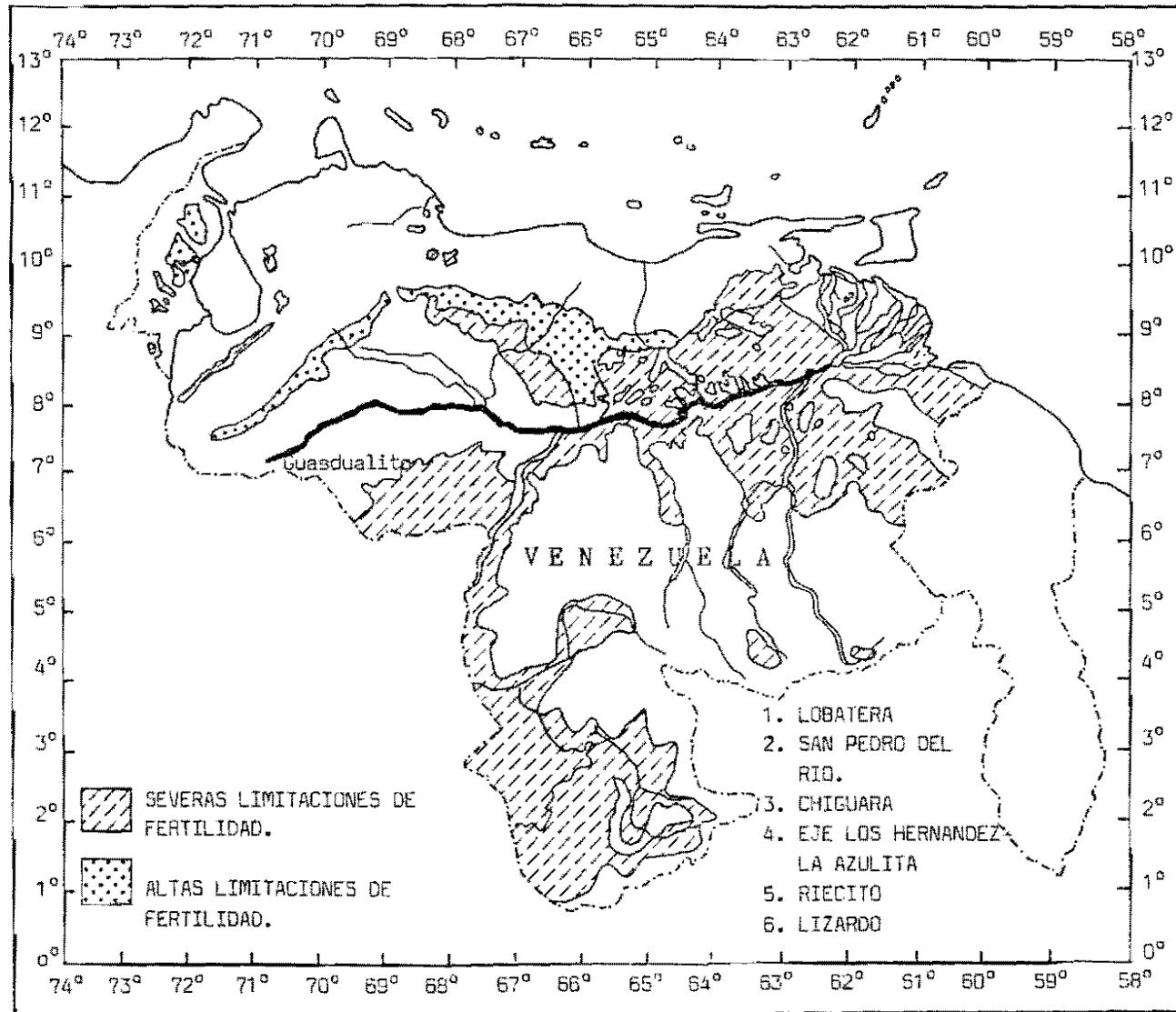


Figura 1. Distribución geográfica de suelos de Venezuela, con altas y severas limitaciones de fertilidad, eje fluvial Apurí-Orinoco y ubicación de los depósitos de rocas fosfóricas.

Estado Mérida. Esta faja ha sido cortada por numerosos fallamientos, tanto locales como regionales, los cuales han sido causantes de numerosos yacimientos aislados. Actualmente, la Dirección de Geología del Ministerio de Energía y Minas, trabaja sobre las estimaciones de las posibles reservas de este yacimiento que representa hasta ahora uno de los grandes de ese mineral no metálico.

Al comparar las reservas de los diversos depósitos naturales de rocas fosfóricas en Venezuela (sin incluir el eje Los Hernández-La Azulita), con las estimaciones de requerimientos de fósforo para la fertilización de los pastos y alimentación animal (Cuadro 1) establecidas en aproximadamente 200.000 t/año (Parra, 1985), se puede concluir que los depósitos naturales de rocas fosfóricas podrían satisfacer esos requerimientos durante los próximos 700 años, lo que representa una alternativa parcial a la salida de divisas del país por concepto de importación de fertilizantes fosforados de alta solubilidad.

Cuadro 1. Estimación de los requerimientos de fósforo (P y P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) de la agricultura vegetal y animal para los años 1988, 1993 y 2000. (miles de toneladas/año). (Parra, 1985).

Año	Cultivos		Pastos		Industria de alimentos concentrados		Suplemento para vacunos en pastoreo		Totales	
	P	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	P	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	P	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	P	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	P	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>
1988	53.4	122.2	21.6	49.5	8.7	20.0	9.7	22.3	93.4	214.0
1993	80.0	183.2	42.1	96.5	9.7	22.3	19.0	43.5	150.8	345.5
2000	136.0	311.5	69.1	158.3	11.2	25.6	31.2	71.4	247.5	566.8

### Caracterización Química y Mineralógica de las Rocas Fosfóricas Venezolanas

Así como cada uno de los depósitos tiene una cantidad de reservas probadas diferentes, también son formaciones distintas, lo que sugiere la necesidad de caracterizar

químicamente a cada una de esas rocas con el fin de conocer cuál es su composición mineralógica, su contenidos de  $P_2O_5$  y de otros compuestos.

En el Instituto de Edafología de la Facultad de Agronomía de la Universidad Central de Venezuela, se han caracterizado químicamente algunas de esas rocas (Casanova y Valderrama, 1986) y los resultados se pueden observar en el Cuadro 2. También el International Fertilizer Development Center (IFDC) ha caracterizado estas rocas en muestras molidas enviadas a esa Institución como parte del Convenio que incluye a Venezuela en la Red Latinoamericana de Rocas Fosfóricas. Las diferencias en los contenidos totales de  $P_2O_5$  no son tan grandes con excepción de los estratos de San Pedro, donde hay diferencias apreciables. Sin embargo, Urbanek (1987) ha reportado valores promedios de  $P_2O_5$  para el primer estrato de 15.5% y 35.5% para el segundo, lo cual se acerca a los datos venezolanos. Los tres laboratorios han seguido las técnicas metodológicas descritas por la A.D.A.C. (1984).

Desde el punto de vista del uso de rocas fosfóricas en la alimentación animal para satisfacer las necesidades de fósforo y calcio, es importante conocer su contenido de fluor, debido a la posibilidad de que se generen problemas de fluorosis. En el análisis de algunas de las rocas del Cuadro 2, se observa que sus contenidos de fluor no son altos con excepción de Lobatera, en comparación con los contenidos de ese elemento en el superfosfato triple fabricado con base en la roca fosfórica de Florida, U.S.A., la cual posee 2.7% de fluor y su uso en la alimentación animal podría ser altamente riesgoso.

El Cuadro 3, señala los tipos de análisis y técnicas empleadas en la caracterización química del Cuadro 2.

Las cantidades de  $P_2O_5$  extraíbles en citrato de amonio normal y neutro merecen especial consideración. Hammond y León (1982) han clasificado las rocas fosfóricas según su solubilidad en citrato de amonio y su efectividad agronómica relativa. Aplicando estos conceptos a las rocas venezolanas, sumando el porcentaje  $P_2O_5$  soluble en citrato en la primera y segunda extracción del Cuadro 2, y comparandolo con la extracción de fósforo por plantas de Brachiaria humidicola (Figura 2) se puede concluir, que las rocas Lizardo aluminica, calcítica, y Riecito son de reactividad media, mientras que Chiguará y Lobatera son de reactividad baja.

McClellan (1978) caracterizó mineralógicamente 600 muestras de rocas fosfóricas provenientes de casi todos los depósitos comerciales del mundo, encontrando una gran variación en la

Cuadro 2. Caracterización química de rocas fosfóricas venezolanas. (Casanova y Valderrama, 1986).

Rocas	Contenidos totales								
	CaCO <sub>3</sub> (%)	F (%)	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (%)		MgO (%)	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	IFDC	
			Universidad Central de Venezuela	IFDC				P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> soluble en citrato 1a extracción (%)	2a extracción (%)
Lobatera	46	2.65*	20	22.3	0.26	0.43	-	<0.1	1.2
Chiguara	12	-	24	27.9	0.15	0.47	-	<0.1	1.5
Riecito	37	0.60	26	29.5	0.12	0.71	0.47	0.8	2.9
Lizardo Calcítica	23	0.41	22	25.0	0.22	1.53	1.40	2.6	3.2
Lizardo Aluminica	19	0.17	23	25.8	0.17	4.37	3.27	3.2	3.4
San Pedro del Rio (1)	-	0.09	19.6	4.6	3.89	3.35	1.9	3.2	1.0
San Pedro del Rio (2)	-	0.05	37	22.1	0.03	0.28	0.42	<0.1	1.8
Jaji	-	-	-	16.1	-	-	-	<0.1	1.1

\* Según Soto, et al (1987).

Cuadro 3. Tipos de Análisis y Técnicas Empleadas.

---

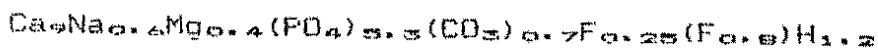
Ca CO <sub>3</sub>	HCl 1N, titulado con Hidróxido de Sodio
F	Electrometría
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Colorimetría
MgO	Espectrofotometría de Absorción Atómica
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Espectrofotometría de Absorción Atómica
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Espectrofotometría de Absorción Atómica .
Mineralogía	Difracción de rayos X sobre polvo al azar; radiación de Cu.
Pérdida por calcinación	Calentamiento a 1000 grados C.
Residuo insoluble en HCl	Disolución en ácido concentrado frío

---

estructura de la apatita constituyente de estas rocas, debido a la sustitución del calcio por magnesio y sodio, así como al reemplazo de hasta el 25% del P por carbonato y F. En consecuencia, ocurre una gran dispersión en cuanto a los valores relativos de esos elementos en las fosforitas de los diferentes yacimientos. En el caso venezolano son pocos los autores que han caracterizado mineralógicamente las rocas fosfóricas.

González, J. et al. (1980) indican que la roca de Lobatera (Estado Táchira) está compuesta de carbonato-fluorapatito, calcita, cuarzo, materia orgánica y óxidos de hierro y de aluminio. Mora, O. (1981) también estudió esta fosforita y señala que está compuesta de la apatita, calcita, yeso y cuarzo.

Pequiven (1986) caracterizó el depósito de Riecito (Estado Falcón), llegando a concluir que el material fosfatado predominante es hidroxifluorapatita, en el cual parte del fosfato ha sido sustituido por carbonato y hasta el 50% del fluor ha sido reemplazado por OH. En consecuencia, esta fosforita debería ser altamente soluble en citrato y deficiente en fluor. La fórmula química calculada es la siguiente:



De acuerdo a ello, el contenido porcentual de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> sería del 38.5%.

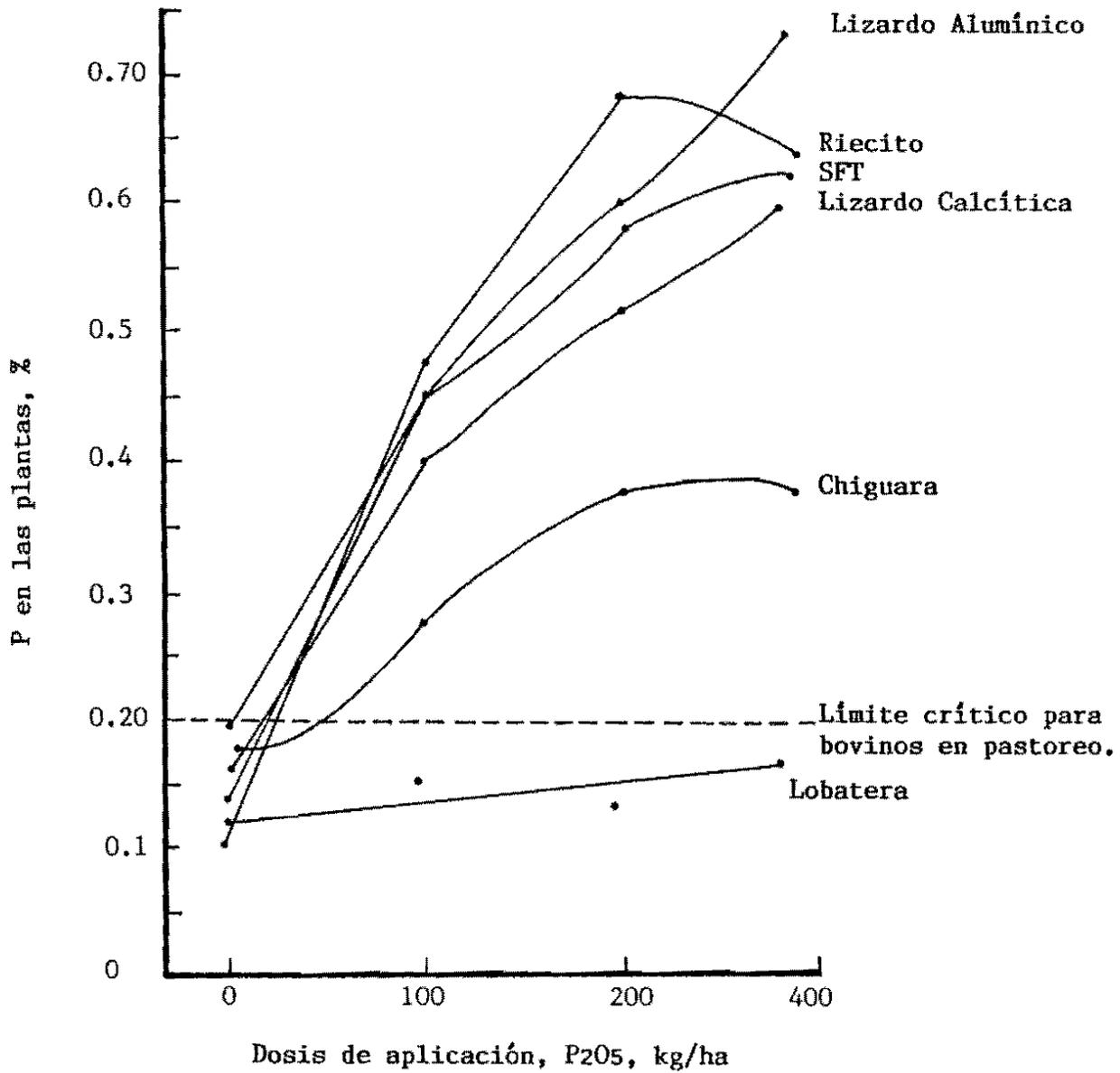


Figura 2. Relación entre el porcentaje de fósforo en plantas de Brachiaria humidicola en el primer corte y la dosis de aplicación de diferentes rocas fosfóricas.

Casanova y Elizalde (1987) han estudiado mineralógicamente siete (7) rocas fosfóricas venezolanas con los resultados que se observan en el Cuadro 4. Según estos resultados, los minerales principales que pueden reconocerse en los difractogramas son solo tres: apatita, calcita y cuarzo. Hay indicios de la presencia de dahllita; pero su reconocimiento por difracción en presencia de apatita no ha sido posible, por lo tanto el porcentaje atribuido a este mineral engloba también a la dahllita.

Cuadro 4. Composición esencial (%) de siete yacimientos venezolanos. (Casanova y Elizalde, 1987).

Yacimiento	Apatita	Calcita	Cuarzo
Lizardo cálcico	67	-	33
Lizardo aluminico	63	-	37
Riecito	87	10	4
Chiguará	34	57	8
Lobatera	24	51	25
San Pedro del Río (2)	56	31	13
San Pedro del Río (1)	28	1	72

Quando se comparan los resultados mineralógicos del Cuadro 4, con los resultados de los análisis químicos (Cuadro 2), se obtiene en general una concordancia aceptable. La Figura 3a, muestra la relación entre el porcentaje de  $P_2O_5$  y el contenido de apatita; en ella parecería que las muestras se agrupan en dos regiones diferentes:

Las fosforitas de Falcón, que para un determinado contenido de  $P_2O_5$  tienen un alto porcentaje de apatita. Ello sugiere la existencia de dos provincias de fosforitas. En la misma figura se ha trazado una línea hipotética que muestra el contenido medio de  $P_2O_5$  de las apatitas normales; el primer grupo queda por encima de dicha línea y el otro por debajo. Ello indicaría que las muestras de Falcón contienen una menor proporción de  $P_2O_5$  incluido en la molécula de la apatita o que contienen una mayor proporción de dahllita. Esto concuerda con el hecho de que esas muestras presentan mínimas cantidades de calcita, pero el contenido de  $CaCO_3$  es considerable. Justamente en la Figura 3b, se observa que no existe una buena concordancia entre el contenido de calcita

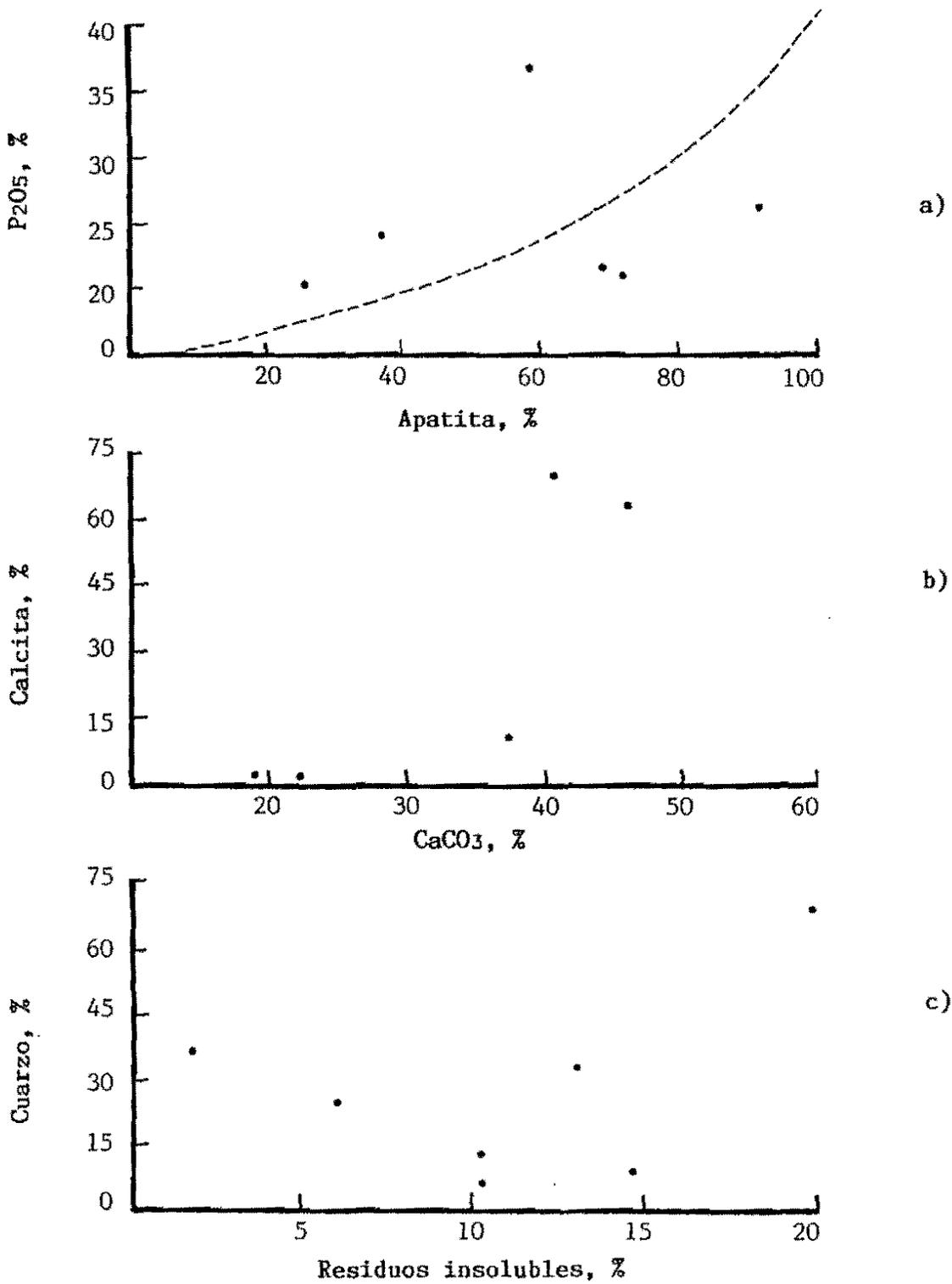


Figura 3. Relación entre los porcentajes de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> y apatita, calcita y CaCO<sub>3</sub>, y cuarzo y los residuos insolubles en las rocas fosfóricas.

determinado por difracción de rayos X y el porcentaje de  $\text{CaCO}_3$  determinado analíticamente, lo cual indica que parte del carbonato se encuentra en otra forma diferente a la calcita. Las otras muestras contienen una relativa alta proporción de  $\text{F}_2\text{O}_5$ , en comparación con el contenido de apatita reconocido por difracción de rayos X; ello sugiere que parte del F podría encontrarse en minerales amorfos del tipo que Pettijon (1963) denomina colofanita, no detectables por difracción.

El Cuadro 5, muestra el porcentaje de residuos insolubles en ácido clorhídrico y la pérdida de peso (porcentual) por calcinación. La figura 3c, muestra que tampoco hay relación entre el porcentaje de cuarzo y el porcentaje de residuo insoluble, lo cual indicaría que este tiene una naturaleza química o estructural diferente. La pérdida por calcinación es siempre muy alta y no permite discriminar entre las diferentes fosforitas. La cuantía de esta pérdida de peso al calentar la muestra, sugiere la presencia de altos contenidos de materia orgánica y sustancias amorfas hidratadas, las que no han sido detectadas en los otros análisis realizados.

Cuadro 5. Pérdida por calcinación y residuo insoluble en HCl.

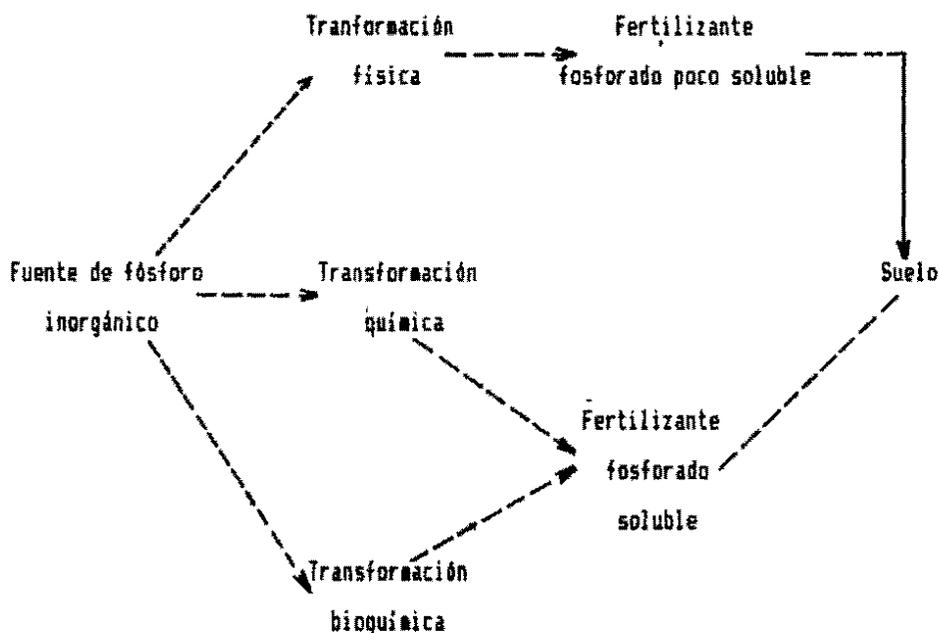
Yacimiento	Pérdida por calcinación (%)	Residuo insoluble (%)
Lizardo cálcico	91.44	13.33
Lizardo aluminico	92.74	1.84
Riecito	89.84	10.16
Chiguará	85.73	14.27
Lobatera	94.24	5.76
San Pedro del Río (2)	90.02	9.98
San Pedro del Río (1)	80.90	19.10

En la mayor parte de las muestras hay una buena relación entre la cantidad de residuo de calcinación y el insoluble en HCl. Las muestras de San Pedro del Río (2) y de Lobatera, se apartan de esa situación general; la primera porque tiene un contenido de residuo insoluble muy alto en

relación con el residuo de calcinación, y en la muestra Lobatera por el contrario, porque tiene éste último demasiado elevado en relación con el primero.

### Caracterización Agronómica de las Rocas Fosfóricas Venezolanas

El uso de las rocas con fines agronómicos puede hacerse de acuerdo a alguna de las alternativas del esquema siguiente:



La selección de la alternativa estratégicamente más conveniente está influenciada por múltiples factores. Uno de ellos es la aptitud específica de la roca fosfatada para ser utilizada según uno u otro procedimiento. Esta aptitud depende en gran medida de su composición mineralógica, por lo tanto, se puede esperar que el conocimiento de la misma permita comprender su comportamiento en los ensayos agronómicos que se están realizando.

Son pocos los estudios que han evaluado el posible uso agronómico de las rocas fosfóricas venezolanas y los que se han realizado generalmente han trabajado con la roca Lobatera del Estado Táchira y la de Riecito en el Estado Falcón.

Schulz e Istok (1963) estudiaron el efecto fertilizante de tres rocas fosfóricas: Lobatera, Corocito y Riecito en ensayos vegetativos de invernadero usando como fertilizante de referencia el superfosfato triple. Estas fuentes fueron

aplicadas en suelos deficientes en fósforo usando como cultivos al maíz y la alfalfa. Estos autores encontraron, que la roca Riecito tenía un alto contenido de fósforo inmediatamente asimilable, mientras que la roca Lobatera con su alto contenido de  $\text{CaCO}_3$  no mostró solubilización en los primeros dos meses y tuvo una marcada tendencia a aumentar el pH de los suelos.

Mora (1981) trabajando con suelos ácidos y pobres en fósforo (Ultisol de la región Machiques-Colón, Zulia) estudió el efecto de caliza y la roca fosfórica Lobatera sobre esos suelos, encontrando para el caso de la fosforita que el pH en agua de los suelos cambió desde 3.98 hasta 4.27; el aluminio intercambiable se redujo de 1.27 a 0.72 meq/100 g de suelo, y el P aumentó de 6.38 ppm hasta 41.6 ppm.

Mora et al. (1983) estudiaron el efecto de la fosforita de Lobatera sobre el crecimiento del coco enano amarillo Malayo, sembrado en suelos ácidos del Zulia. Sus resultados demuestran que esa planta no tolera la acidez del suelo en su condición natural; pero con la aplicación de 2.8 kg de fosforita/planta/año se obtendría una respuesta biológica significativa en el desarrollo de la planta, debido a cambios en algunas características del suelo (pH, contenido de fósforo, capacidad de intercambio de cationes, aluminio intercambiable y porcentaje de saturación con aluminio) como consecuencia de la aplicación de fosforita.

Atencio (1978) estudió el efecto de la cal, superfosfato triple y roca fosfórica "Lobatera" en suelos de la Cuenca del Lago de Maracaibo, utilizando como cultivo indicador el Panicum maximum. Este autor encontró que la cal no afectó la producción forrajera, y que en la primera cosecha el aumento de materia seca de la gramínea se debió a la aplicación de fósforo proveniente del superfosfato triple. A partir de la segunda cosecha, se produjo un aumento en los rendimientos como respuesta a la aplicación de P provenientes de la roca fosfórica y superfosfato triple.

Urdaneta y otros (1979) en la misma región Machiques-Colón, usando roca fosfórica en el establecimiento de gramíneas-leguminosas, encontró en todas las especies un incremento en los rendimientos con la utilización de la fosforita. Sin embargo, dosis muy altas de fosforita (1.500 kg/ha) disminuyeron los rendimientos.

Brito et al. (1982) estudiaron el efecto de la aplicación de roca fosfórica de Riecito y azufre en el rendimiento y valor nutritivo de las sabanas de Trachypogon de Anzoátegui y Bolívar. Estos autores encontraron que la combinación de 150 kg/ha de  $\text{P}_2\text{O}_5$  aplicados como roca fosfórica y 60 kg/ha de azufre aumentó, en las distintas especies de leguminosas

nativas, un 15% para el primer año en relación con la parcela testigo y 231% 4 años. Los niveles de absorción de P para las leguminosas alcanzaron el límite de 0.1%.

Se sugiere la evaluación agronómica de los nuevos depósitos de roca fosfórica en el país, con el fin de su posible recomendación en el uso de las sabanas ácidas venezolanas.

Casanova y Valderrama (1986) han medido la eficiencia agronómica relativa (EAR) de estas rocas en comparación con el superfosfato triple (SFT), usando como cultivo la Brachiaria humidicola, encontrándose la menor EAR para la roca de Lobatera, las otras rocas (Lizardo, Riecito y Chiguará) en dosis de 100 kg/ha presentaron rendimientos en materia seca similares o superiores a los de superfosfato triple. Con el fin de observar si las plantas tienen buen suplemento de fósforo, se obtuvo la Figura 2, la cual demuestra que en el suelo estudiado (Entic Chromuster arcilloso fino) de Santa María de Ipire, Estado Guárico, cuando no se aplica P la planta no logra cubrir el límite crítico para la nutrición de bovinos en pastoreo.

Desde el punto de vista de la alimentación animal usando como fuente de fósforo a las rocas fosfóricas, Monrroy (1986) estudió la eficiencia de utilización del fósforo de las rocas de Lizardo, Riecito, Lobatera y Chiguará con pollos recién nacidos sometidos a las siguientes raciones experimentales: ración basal (0.3% P y 0.87% Ca), fuente testigo de fósforo ( $\text{Na}_2\text{HPO}_4$ ) y las rocas fosfóricas con tres niveles de aporte de P suplementario (0.5%, 0.75% y 1%) y finalmente un alimento comercial. Al décimo día se pesaron y sacrificaron los pollos separándose la tibia izquierda para determinar el porcentaje de biodisponibilidad del P, porcentaje de cenizas en la tibia, consumo, ganancia de peso y eficiencia de conversión de alimentos. Las rocas de Lizardo y Riecito mostraron los mayores valores de biodisponibilidad (Cuadro 6); pero este valor se redujo con el incremento de las dosis de P posiblemente debido a niveles excesivamente altos de Ca que causarían interferencia en el uso del P y otros elementos. Los resultados señalan la posibilidad de sustituir parcialmente las fuentes inorgánicas de fósforo actualmente importadas por rocas fosfáticas nacionales.

El cálculo de la biodisponibilidad se hizo en la forma siguiente:

Biodisponibilidad =  $R/T \times 100$ , en la cual  $R = \% \text{ de cenizas de la tibia} - \% \text{ cenizas de la tibia en la ración basal} \times T$  teórico de cenizas de la tibia (calculado a partir de la ecuación  $y = a + b \times$ , donde  $y = \% \text{ cenizas de la tibia}$  para los diferentes niveles de la ración testigo,  $\times = \text{logaritmo}$

del % de P (Suplementario en los niveles de la ración testigo determinados en laboratorio) - % de cenizas en la ración basal.

Cuadro 6. Porcentaje de biodisponibilidad del fósforo en cuatro rocas fosfatadas venezolanas.

Roca fosfatada	Nivel de la Roca fosfatada	Biodisponibilidad del fósforo, %*
Lobatera	I	39.9 ± 2.75 ef
	II	37.7 ± 6.54 ef
	III	26.2 ± 3.49 f
Lizardo	I	4.7 ± 4.88 cde
	II	64.2 ± 6.24 bc
	III	57.9 ± 2.57 cd
Riecito	I	84.7 ± 15.52 a
	II	76.7 ± 5.03 ab
	III	48.8 ± 12.78 de
Chiguará	I	52.7 ± 4.47 cde
	II	26.6 ± 1.42 f
	III	11.8 ± 3.91 g

\* Medias con letras comunes no muestran diferencias estadísticamente significativas (P 0.05).

Durante 1987 se han comenzado una serie de experimentos conducentes a evaluar las diferentes rocas fosfóricas en condiciones de invernadero y pruebas de campo en diferentes partes del país. Casanova y Cori (1987) en el oriente venezolano, están combinando el uso de las rocas fosfóricas con las escorias en la fertilización de pastos.

Las escorias básicas son un subproducto de la industria siderúrgica y se originan en el proceso de purificación del hierro y fabricación del acero. Presentan una composición química muy variable debido principalmente al mineral de

hierro que les da origen y al proceso utilizado en su obtención. Su importancia agrícola radica en el hecho de que aportan cantidades considerables de macro y microelementos y a que pueden ser utilizadas como enmienda en suelos ácidos.

La necesidad de desarrollar una agricultura de bajos insumos y la posibilidad de utilizar este subproducto de casi ningún uso, ha despertado el gran interés por estudiar diferentes aspectos relacionados con su uso. Uno de estos aspectos es la gran variabilidad en la composición química de las escorias, por lo cual una tarea inicial sería la de definir y normalizar lo que serían las escorias básicas de uso agrícola.

Reyes (1983) caracterizó tres tipos de escorias provenientes de SIDOR y sus resultados se observan en el Cuadro 7. Se aprecia gran similitud en la composición química de las escorias E1 y E2. Esta semejanza parece estar relacionada con el hecho de provenir ambas de esquemas tradicionales de producción del acero en SIDOR. La escoria E3, posee mayor contenido de calcio y magnesio y solamente trazas de  $P_2O_5$ . También, es importante la granulometría de estos materiales, ya que se requiere una finura adecuada para garantizar su efecto agrícola. En Puerto Ordaz, Estado Bolívar, se ha comenzado la experimentación que combina 4 dosis de fósforo (0, 50, 100, 200 kg  $P_2O_5$ /ha) de 4 fuentes diferentes (Riecito, Lizardo aluminica, San Pedro del Río (2) y superfosfato triple), tres dosis de escoria (0, 300 y 600 kgCa/ha) y Brachiaria decumbes. Este diseño incluye una prueba semicomercial que trata de una vez validar la hipótesis experimental: la combinación de 100 kg  $P_2O_5$ /ha de la roca San Pedro del Río con 300 kg Ca/ha provenientes de la escoria debe dar los mejores rendimientos del pasto. Los datos del Cuadro 8, reflejan los efectos de los tratamientos en el primer corte: la aplicación de las diferentes fuentes fosforadas sin escoria produjo aumentos en la producción de materia seca, b) la aplicación de las diferentes dosis de escoria sin fósforo mantuvo una tendencia a aumentar ligeramente los rendimientos c) los mejores rendimientos se obtuvieron con los siguientes tratamientos: la combinación de 200 kg  $P_2O_5$ /ha de la roca Riecito y 300 kg Ca/ha de la escoria, la mayor dosis de superfosfato sin escoria y la mayor dosis de Lizardo sin escoria.

De los experimentos diseñados por el International Fertilizer Development Center (IFDC) 1986, en Venezuela se están evaluando rocas fosfóricas con base en la metodología descrita en el "Experimento de Uniformización y Evaluación de Fertilizantes con Rocas Fosfóricas, "Red Latinoamericana de Trabajo para Fertilizantes con Rocas Fosfóricas". Dos trabajos se están realizando: a) Evaluación Agronómica de

Cuadro 7. Características químicas y granulometría de tres escorias básicas provenientes de la Siderúrgica del Orinoco, C.A.

Tipo de escoria	Ca (%)	Mg (%)	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (%)	Mn (%)	Fe (%)	Cu (%)	Zn (%)	Valor de neutralización equiv. de CaCO <sub>3</sub> (%)	Partículas que pasan por los tamices de:	
									18 mallas (%)	100 mallas (%)
E <sub>1</sub>	22.82	6.45	0.87	2.93	23.45	0.0023	0.034	74	100	86.96
E <sub>2</sub>	16.12	4.59	0.85	3.85	25.24	0.0071	0.031	70	100	79.56
E <sub>3</sub>	28.85	6.57	Trazas	0.69	1.13	0.0012	0.024	102	100	97.08

E<sub>1</sub> = Escorias básicas acerías eléctricas.

E<sub>2</sub> = Escorias básicas Siemens-Martín.

E<sub>3</sub> = Escorias básicas Hornos eléctricos.

Cuadro 8. Efecto de los tratamientos de fósforo y escoria sobre los rendimientos en materia seca de Brachiaria decumbens en Upata, Puerto Ordaz, primer corte, promedio sobre dos repeticiones.

Materia seca (g/0.25 m <sup>2</sup> )				
Fuentes de fósforo	Dosis (kg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> /ha)	Dosis de Escoria (kg/Ca/ha)		
		0	300	600
Riecito	0	29.05	44.23	35.25
	50	29.24	26.02	39.05
	100	39.92	39.00	55.54
	200	60.85	67.89	42.07
Lizardo	0	34.03	42.79	36.35
	50	37.88	34.54	35.98
	100	33.90	42.86	32.00
	200	61.25	35.67	41.05
San Pedro del Río (2)	0	36.87	28.20	33.05
	50	51.23	30.86	26.92
	100	53.87	46.36	36.40
	200	44.47	44.14	37.34
Superfosfato triple	0	35.66	45.84	38.00
	50	46.13	37.86	53.48
	100	58.93	33.02	39.80
	200	69.38	59.73	63.32

Rocas Fosfóricas Venezolanas usando como cultivo indicador el maíz en un suelo de Chaguaramas, Estado Guárico, b) Evaluación Agronómica de Rocas Fosfóricas Venezolanas transformadas física y químicamente usando como cultivo indicador el maíz en un suelo de la Mesa de Guanipa, Oriente de Venezuela. Las rocas preparadas en el IFDC en Octubre de 1981, fueron las siguientes: a) Roca de Riecito finamente molida, b) Roca de Lobatera finamente molida, c) Roca Riecito granulada -6+14 mallas acidulada con 20% de  $H_2SO_4$  con resultado en 50% de  $P_2O_5$  soluble en agua, e) Roca Riecito cogranulada con superfosfato triple en 20% y con 25% de  $P_2O_5$  soluble en agua y con tamaño de -6+14 mallas, f) Roca Riecito granulada con superfosfato triple en 40% y con 50% de  $P_2O_5$  soluble en agua y con tamaño -6+14 mallas, g) roca Lobatera acidulada con  $H_2SO_4$  al 20% con tamaño de -6+14 mallas y 25% de  $P_2O_5$  soluble en agua, h) Roca Lobatera acidulada con  $H_2SO_4$  al 40% con tamaño de -6+14 mallas y 50% de  $P_2O_5$  soluble en agua, i) superfosfato triple.

Las dosis de fósforo aplicadas de cada fuente fueron 100, 200 y 300 kg  $P_2O_5$ /ha y los resultados (Vera, J., Sánchez, C. y Casanova, E. 1987 en prensa) indican (Cuadro 9): a) la prueba de medias por el rango múltiple de Duncan señalan que la mejor fuente de este primer corte fue el superfosfato triple, luego Lobatera acidulada 40%, Riecito al 40% con superfosfato y Riecito en polvo con rendimientos similares, luego Riecito acidulada al 40% y Lobatera en polvo, y por último Lobatera acidulada al 20%, Riecito al 20% con superfosfato y Riecito acidulada al 20%, b) el análisis de media indica que la mejor dosis es 300 kg  $P_2O_5$ /ha, seguida de 200 y 100 respectivamente, e) existió una correspondencia entre las mejores fuentes y la absorción de fósforo por las plantas.

Igualmente las rocas fosfóricas venezolanas están siendo evaluadas de acuerdo al procedimiento del IFDC en suelos ácidos del Estado Barinas que se usan actualmente en forma intensiva en cultivos de sorgo y maíz.

La transformación bioquímica de las rocas fosfóricas venezolanas ha sido propuesta a la Unidad de Programación Especial del Sur-Oeste venezolano, que es una institución dependiente del Fondo de Inversiones de Venezuela y encargado de la explotación de los depósitos de Fósforo del Estado Táchira. Ellos tienen la posibilidad de establecer un convenio con la Universidad Técnica de Warsaw en Polonia (Urbanek, 1987), la cual propone alternativas de producción de fertilizantes de alta solubilidad a partir de los depósitos de fosfatos del Táchira con especial énfasis en San Pedro del Río y Navay. Algunos de los procesos sugeridos incluyen:

Cuadro 9. Evaluación agronómica de diferentes fuentes de fósforo transformados física y químicamente en un suelo de la Mesa de Guanipa, usando como cultivo indicador al maíz, promedio de tres repeticiones (1° corte). Venezuela (Vera, J.; Sánchez, C. y Casanova, E. 1987 en prensa)

Fuentes	Dosis de fósforo		Rendimiento materia seca (g/planta)	P (mg/planta)
	kg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> /ha			
SFT	100		6.18	16.64
	200		6.30	20.82
	300		8.25	29.67
Riecito Polvo	100		3.36	10.66
	200		4.63	15.44
	300		5.93	20.46
Riecito 20% H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	100		2.26	2.44
	200		3.16	7.78
	300		3.43	8.91
Riecito 40% H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	100		3.39	10.26
	200		3.64	10.64
	300		3.97	12.95

(Continua)

Cuadro 9. Evaluación agronómica de diferentes fuentes de fósforo transformados física y químicamente en un suelo de la Mesa de Guanipa, usando como cultivo indicador al maíz, promedio de tres repeticiones (1° corte). Venezuela (Vera, J.; Sánchez, C. y Casanova, E. 1987 en prensa). (Continuación).

Fuentes	Dosis de fósforo		Rendimiento materia seca g/planta	P (mg/planta)
	kg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> /ha			
	100		1.22	3.54
Riecito	200		3.41	10.57
20% SFT	300		4.24	18.44
	100		3.67	8.78
Riecito	200		4.99	15.29
40% SFT	300		5.37	17.50
	100		2.64	8.53
Lobatera	200		3.80	12.98
Polvo	300		4.29	15.56
	100		2.25	6.34
Lobatera	200		2.43	7.88
20% H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	300		4.23	13.79
	100		4.11	10.15
Lobatera	200		4.28	11.15
40% H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	300		6.72	21.90

1. La producción de nitrato de amonio (34-0-0) y superfosfato triple (0-45-0) en una planta llamada nitrofosfato.
2. Producción del fertilizante azufre-fosfato.
3. Proceso polifertilizante.
4. Proceso húmedo con ácido sulfúrico con producción de superfosfato simple y triple.
5. Producción de termofosfatos.
6. Proceso de defluorinación por alta temperatura.

Existe la posibilidad de la construcción de una planta piloto para la producción del fertilizante azufre-fosfato, de acuerdo con el esquema ilustrado en la Figura 4. El fertilizante producido es de liberación lenta de  $P_2O_5$  y azufre y usa procesos físico-químicos de transformación de las rocas y biológicas con el uso de bacterias del género "Thiobacillus". La construcción de una planta de esta naturaleza debe tomar en consideración la calidad de la roca fosfórica, costos de inversión y mantenimiento, y requerimientos agronómicos de fertilizantes fosfatados en Venezuela.

### Agradecimiento

El autor desea expresar su agradecimiento al International Fertilizer Development Center (USA), a la Unidad de Programación Especial del Suroeste Venezolano, que coordina la explotación de los yacimientos en el Estado Táchira, con quienes se mantienen relaciones a través de Convenios para el estudio de la roca fosfórica venezolana, y finalmente, al Consejo de Desarrollo Científico y Humanístico (C.D.C.H.), de la Universidad Central de Venezuela, por el apoyo financiero para el desarrollo de este proyecto.

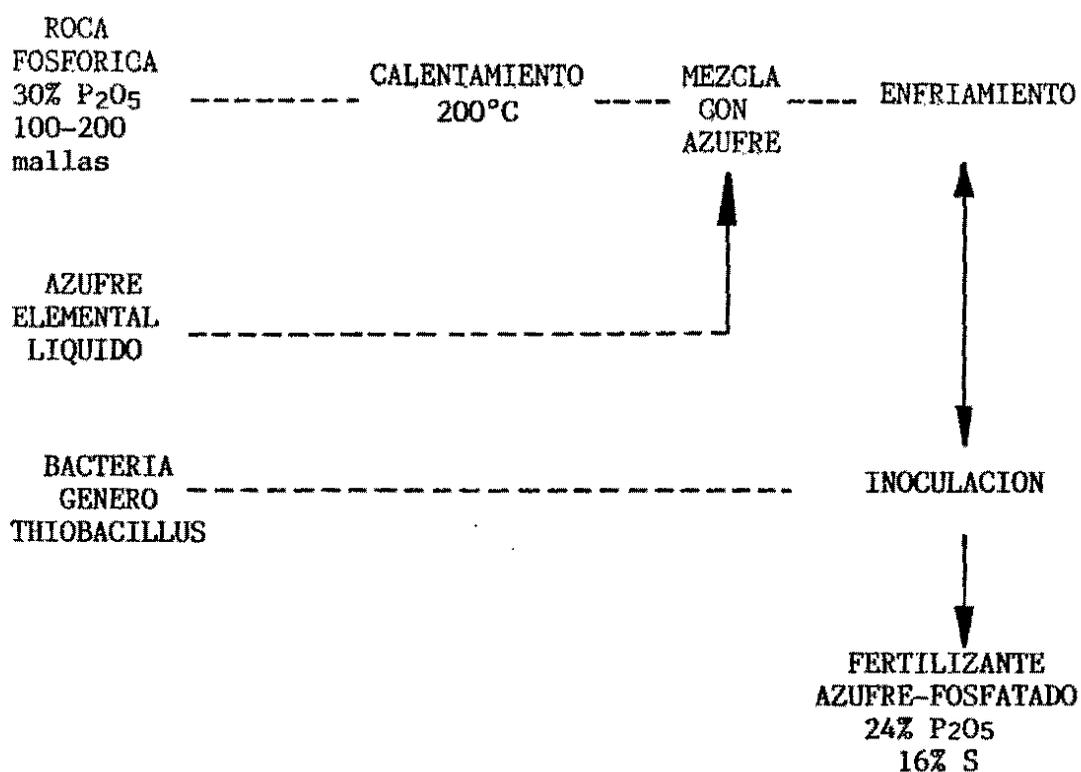


Figura 4. Proceso esquemático de la producción de fertilizante azufre-fosfatado sugerido por la Universidad Técnica de Warsaw de Polonia, a partir de la roca fosfórica de San Pedro del Río, Estado Táchira.

## REFERENCIAS

- Association of Official Analytical Chemists. 1984. Official methods of analysis. 15th ed. Washington, D.C.
- Atencio, A. 1978. Efecto de la cal, superfosfato triple y fosforita sobre la disponibilidad del fósforo, la neutralización del aluminio, la capacidad efectiva de intercambio catiónico y la producción de materia seca en un Ultisol. Universidad del Zulia, Facultad de Agronomía. V Congreso Venezolano de la Ciencia del Suelo. Barquisimeto.
- Brito, P.; S. Rodriguez; J. Brito y V. Gamboa. 1982. Efecto de la aplicación de roca fosfórica y azufre en el rendimiento y valor nutritivo de las Sabanas de Trachypogon. Agronomía Tropical. Vol. XXXII. 13-38.
- Casanova, E. y Carmen, C. 1987. El uso de escorias y rocas fosfóricas en la región oriental de Venezuela. Taller "Dolomita, Escorias y Fosforitas como Enmiendas y Fuentes de Nutrimientos". CVG. PALMAVEN. FONAIAP. UCV-FABRO. 17p.
- Casanova, E. y Elizalde, G. 1987. Caracterización mineralógica de las rocas fosfóricas venezolanas. IX Congreso Venezolano de la Ciencia del Suelo y X Congreso Latinoamericano de la Ciencia del Suelo. Maracaibo, Zulia, Venezuela.
- Casanova, E. y U. Valderrama. 1986. Potencial de las rocas fosfóricas venezolanas en la agricultura nacional. Seminario Nacional "Los Fertilizantes y la Productividad Agrícola". MAC. PALMAVEN. UCV-FABRO. Caracas, Venezuela. 12p.
- Gonzalez, J.; C. Iturralde A. y Picard, C. 1980. Geología de Venezuela y de sus Cuencas Petrolíferas. Ed. FODINVES. Caracas. 2 Tomos.
- Hammond, L.L. y L. A. Leon. 1982. Efectividad agronómica de las rocas fosfóricas. Centro de Agricultura Tropical. Cali, Colombia. 40 p.
- International Fertilizer Development Center. 1986. Experimento de Uniformización y evaluación de fertilizantes con rocas fosfóricas. Red Latinoamericana de trabajo para fertilizantes con rocas fosfóricas. Experimento FC-1936-86. Muscle Shoals, Alabama, USA.

- McClellan, G.H. 1978. Mineralogy and reactivity of phosphate rocks. pp. 57-81 In. IFDC Seminar on Phosphate Rock for Direct Application. Haifa, Israel.
- Mora, O. 1981. Efecto de la aplicación de dos fuentes de enmiendas (caliza y fosforita) sobre un Ultisol de la región Machiques-Colón, Distrito Catatumbo, Estado Zulia. X Jornadas Agronómicas, San Cristóbal, Táchira. 42 p.
- Mora, O.; C. Berrios y H. Rosales. 1983. Efecto de la aplicación de fosforita sobre el crecimiento del Coco Enano Amarillo Malayo, sembrado en los suelos ácidos de la región Machiques-Colón, Distrito Catatumbo, Estado Zulia. VII Congreso Venezolano de la Ciencia del Suelo, San Cristóbal, Estado Táchira.
- Parra, R. 1985. Informe sobre el suministro de fósforo para la agricultura vegetal y animal venezolana. Facultad de Agronomía, Universidad Central de Venezuela.
- Pequiven. 1986. Cuenca fosfática de Falcón. Su importancia para Petroquímica de Venezuela, S.A. Congreso Internacional sobre la industria de los fertilizantes. ADIFAL. Caracas, Venezuela. 11 p.
- Pettijohn, F.J. 1963. Rocas sedimentarias. EUDEBA.
- Reyes, G. 1983. Caracterización química de las escorias básicas provenientes de la industria del hierro y su posible utilización agrícola. Tesis de Grado. Facultad de Agronomía, UCV. Maracay.
- Sanchez, P.A. and Salinas, J. 1984. Low input technology for managing Oxisols and Ultisols in tropical America. Advances in Agronomy. 34:279-406.
- Schulz, S. e Istok, A. 1983. Tres rocas fosfatadas venezolanas y la comprobación de su efecto fertilizante en ensayos vegetativos de invernadero. Separata de la Revista de la Facultad de Agronomía. Maracay. Vol. III. Nº. 2.
- Soto, E.; N. Obispo; C. Chicco y A. Valle. 1981. Características químicas y físicas de rocas fosfáticas nacionales y otras fuentes de fósforo. Congreso Venezolano de Ingeniería Química. Caracas. 10 p.
- Urbanek, A. 1987. Technical report concerning phosphate fertilizer production from Táchira State rock phosphates in Venezuela. Warsaw Technical University, Warsaw, Polonia.

Urdaneta, I.; J. Landaeta y J. Neuman. 1978. Variaciones en algunas propiedades químicas de un Ultisol y su relación con los rendimientos de materia seca de cuatro gramíneas forrajeras. Trabajo presentado en el V Congreso Venezolano de la Ciencia del Suelo. Barquisimeto, Estado Lara.

## 11. EVALUACION AGRONOMICA DE FERTILIZANTES FOSFATADOS EN EL CERRADO BRASILEIRO

Wenceslao J. Goedert\*  
Djalma M.G. Souza\*  
Edson Lobato\*  
Thomas A. Rein\*

### RESUMEN

Los fosfatos naturales brasileiros son de baja solubilidad y de baja eficiencia agronómica para cultivos anuales. Para los pastos, su eficiencia inicial también es baja, pudiendo mejorar con el tiempo, en función de la dosis, del suelo, del manejo y del tipo de pasto. Teniendo en cuenta estas características, el uso directo de los fosfatos naturales es muy limitado, siendo más viable su transformación en formas más solubles. Los productos de transformación más comunes en Brasil son superfosfatos y fosfato diamonio, los cuales se constituyen en fuentes de comprobada eficiencia agronómica. A pesar de esto, hay necesidad de obtener productos con tecnología más simple y que mejoren el aprovechamiento de las materias primas disponibles en el país. Una de las opciones ha sido la producción de fosfatos parcialmente acidulados con ácido sulfúrico, cuya eficiencia agronómica ha sido proporcional a la fracción de apatita solubilizada por el ácido. Otras alternativas de solubilización química actualmente en prueba son: ácido nítrico, ácido fosfórico, fosfato y nitrato de urea y bisulfato de amonio. Finalmente, se debe destacar una alta eficiencia agronómica de los productos de procesos térmicos, indicando que serán de gran potencial para suelos tropicales ácidos.

### Introducción

La mayoría de los suelos de la región del Cerrado brasileiro contienen baja proporción de fósforo total y muy bajo de fósforo disponible para las plantas. Además, los suelos arcillosos presentan alta capacidad de retención del fósforo aplicado a través del fertilizante. Como consecuencia, son necesarias dosis elevadas de fertilizantes fosfatados para obtener producciones económicas a partir del primer año de cultivo (Goedert et al., 1985b).

---

\*Investigadores del Centro de Pesquisa Agropecuaria dos Cerrados (CPAC), EMBRAPA, Cx. Postal 70.0023, CEP 73.300, Planaltina-DF, Brasil

La necesidad de grandes cantidades de fertilizantes y su precio resultan en alto costo de esta práctica. Por otro lado, los fosfatos son recursos naturales no renovables y son sustituibles. La suma de estos factores hace que sea vital la búsqueda de eficiencia agronómica en la utilización de los fertilizantes fosfatados.

Varias medidas, cuando se tomen simultáneamente, pueden volver más eficiente el aprovechamiento de los fertilizantes fosfatados. Entre ellas, las más importantes son: 1) La reducción de la capacidad de fijación de fósforo del suelo, antes de su aplicación; 2) Combinación de dosis y de métodos de aplicación; 3) Utilización racional de fuentes de fósforo disponible en la región; 4) Obtención de la máxima absorción de fósforo por las plantas; 5) Desarrollo de sistemas de producción eficaces. Dada la naturaleza de este trabajo, será dado mayor énfasis a la discusión del ítem 3.

La tarea de evaluar la eficiencia agronómica de fuentes de fósforo es relativamente simple, pero para comparar los datos obtenidos por diferentes investigadores es necesario que sean utilizados algunos principios metodológicos similares. En nuestro trabajo serán considerados como fuentes de referencia el superfosfato simple y triple y serán utilizados dos índices: Índice de Eficiencia Agronómica (IEA) y Equivalente en Superfosfato Triple (Eq SFT) calculados así:

$$\text{IEA (\%)} = \frac{(\text{prod. fuente evaluada}) - (\text{prod. testigo})}{(\text{Producción fuente ref.}) - (\text{producción testigo})} \times 100$$

Eq SFT = Relación porcentual entre una dosis de  $P_2O_5$  de la fuente evaluada y de superfosfato triple que corresponden a la misma producción. Este índice es calculado a partir de una curva de respuesta con superfosfato triple.

### **Eficiencia Agronómica de Fosfatos Naturales**

El concepto de fosfato natural varía de un país a otro. En el Brasil, representa aquel material que pasa por los procesos de mineralización, molienda y concentrado, sin sufrir procesos de solubilización industrial.

Existen varias minas de fosfatos localizadas en, o próximas a, la región de los Cerrados (Beisiegel y Souza, 1986), y entre ellas las más importantes son la de Araxá, Tapira y Fatos de Minas (Estado de Minas Gerais), Catalao (Goiás), Jacupiranga e Ipanema (Sao Paulo). En su mayoría esas rocas son de origen ígneo y consecuentemente, presentan muy baja solubilidad (Cuadro 1).

Cuadro 1. Características químicas de los fosfatos naturales brasileiros. (Alcala y Ponchio, 1980).

Fosfato	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> Total	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> Soluble (%)	
		Acido cítrico <sup>a</sup>	Citrato neutro de amonio <sup>b</sup>
Abaeté (MG)	24	4.0	1.1
Araxá (MG)	36	4.5	1.9
Catalao (GO)	37	2.5	1.5
Jacupiranga (SP)	33	1.9	0.3
Patos de Minas (MG)	24	3.8	2.3
Tapira (MG)	37	2.6	1.7
Olinda (PE)	26	5.3	1.3
Alvorada (SP)	30	6.6	2.1
Ipanema (SP)	40	2.9	1.7

\* Solución de ácido 2% (relación fosfato: solución = 1:100).

<sup>b</sup> Solución de citrato neutro de amonio (relación fosfato:solución=1:250)

Por regla general, cuando son evaluados con cultivos anuales, estos fosfatos han revelado baja eficiencia agronómica, conforme se observa en el Cuadro 2. En ese experimento, antes del cultivo, fue aplicada cal dolomítica elevando el pH en agua del suelo hasta aproximadamente 6.0. Las producciones obtenidas con los fosfatos naturales fueron bajas y prácticamente no se observó con el tiempo mejoría en la eficiencia agronómica.

En el Cuadro 3 se presentan algunos resultados de un trabajo donde los fosfatos también fueron aplicados sólo el primer año, cosechándose luego cinco cultivos con especies anuales (trigo, soya, arroz y sorgo), y después se sembró el pasto-andropogon (*Andropogon gayanus*). Cuando se compararon con superfosfato triple, lo mismo que con el fosfato natural de Gafsa (Norte de Africa), de origen sedimentario, los fosfatos naturales brasileiros presentaron baja eficiencia agronómica. El hecho de que la eficiencia de estos

materiales sea un poco superior en condiciones de alta acidez del suelo, conforme lo observado por Goedert y Lobato (1980), no es relevante, ya que para obtener producciones comerciales en los suelos del Cerrado el encalamiento es necesario.

Cuadro 2. Producción de soya durante cuatro años en un latosol Rojo-Oscuro arcilloso del Cerrado, en respuesta a fosfatos naturales aplicados al voleo en el primer cultivo en dosis de 249 kg de  $P_2O_5$ /ha. (Goedert, Rein y Souza, datos no publicados).

Fosfato	Producción de granos (kg/ha)			
	1 <sup>er</sup> año	2 <sup>o</sup> año	3 <sup>er</sup> año	4 <sup>o</sup> año
Patos de Minas (MG)	397	207	224	243
Araxá (MG)	689	378	315	252
Catalao (GO)	360	158	145	107
Tapira (MG)	396	163	167	153
Anitápolis (SC)	352	179	174	134
Superfosfato triple	2258	1836	1297	817
Testigo (-P)	150	104	91	48

La misma consideración se hace con respecto al efecto residual acumulado en algunos años. Un análisis de los datos indica que los fosfatos naturales brasileiros no presentan viabilidad agronómica para utilización exclusiva con cultivos anuales, a pesar del menor precio por unidad de  $P_2O_5$  total. Esta demostración sugiere que la mejor estrategia es la solubilización, parcial o total, de estos fosfatos antes de su aplicación al suelo.

Con respecto a cultivos perennes, principalmente pastos, los resultados obtenidos con los fosfatos naturales brasileiros han sido mejores, cuando se comparan con los obtenidos con cultivos anuales. En una revisión de literatura realizada recientemente por Sanzonowicz y Goedert (1986), con respecto al uso de fosfatos naturales en pastos, fue posible observar que:

- a) La eficiencia de los fosfatos depende del tipo de suelo (textura y pH).

Cuadro 3. Eficiencia agronómica de los fosfatos en un Latosol Rojo-Oscuro arcilloso, calculada a partir de la cantidad de fósforo absorbida durante cinco años de cultivo con especies anuales seguidas de tres años de pasto andropogon. Los fosfatos fueron aplicados en el primer año a una dosis de 200 kg de  $P_2O_5$ /ha. (Goedert y Lobato, 1984).

Fosfato	Índice de eficiencia agronómica (IEA %)		
	Cultivo anual	Andropogon	Total
Patos de Minas	45	81	59
Araxá	27	69	41
Abaeté	21	86	43
Catalao	8	36	17
Gafsa	93	110	104
Termofosfato magnésico	92	142	113
Superfosfato triple	100	100	100

- b) El valor del IEA depende de la dosis evaluada, para dosis bajas es muy baja, indicando que esas dosis no permiten un buen establecimiento de las pasturas;
- c) La mayoría de los experimentos son de corta duración y no permiten evaluar el efecto residual;
- d) La media aritmética de los valores del IEA, calculada a partir de varios experimentos de campo e invernadero, se sitúa alrededor del 30%, confirmando el hecho de que los fosfatos naturales brasileiros son de lenta y baja solubilidad en el suelo.

Con el objetivo de complementar la información de la literatura se presentarán y discutirán los resultados obtenidos con un experimento de larga duración con Brachiaria decumbens, iniciado en 1974 en el Centro de Pesquisa Agropecuaria dos Cerrados (CPA/EMBRAPA- Sanzonowics et al., 1987). En este ensayo, fueron comparados un fosfato natural de Araxá, un fosfato de Gafsa (Hiperfosfato), un termofosfato magnésico y un superfosfato simple, en un

Latosol rojo-oscuro de textura arcillosa, cubierto originalmente con vegetación de cerrado. La cal y los fosfatos fueron aplicados en la superficie e incorporados en la capa arable antes de sembrar la pastura. Fueron utilizados tres dosis de  $P_2O_5$  total (87, 343, y 1374 kg/ha) para todas las fuentes, combinadas con tres niveles de cal (0, 3.0 y 4.5 t/ha de cal dolomítica).

Se observó respuesta en la producción de materia seca hasta el nivel más elevado de P aplicado (Cuadro 4). Entre tanto los mayores incrementos de producción ocurrieron cuando se aumentó la dosis de  $P_2O_5$  de 87 a 343 kg/ha. En términos de producción total de materia seca, los fosfatos tuvieron la siguiente eficiencia: Superfosfato simple = termofosfato magnésico > fosfato natural de Gafsa/Marruecos (Hiperfosfato) > fosfato natural de Araxá. Con el transcurso de la lenta solubilidad inicial, hubo establecimiento más lento del pasto con el fosfato de Araxá (Figura 1) y la producción acumulada de materia seca durante el período experimental fue inferior a la obtenida con superfosfato simple.

El fosfato de Araxá tuvo durante los dos primeros años un desempeño perjudicado en parte en las parcelas que recibieron cal. En tanto este efecto desapareció con el pasar del tiempo, y en ausencia de la cal, de modo general no se afectó la producción, indicando que el pasto Braquiaria posee buena tolerancia a los niveles de aluminio encontrados en el suelo (cerca de 70% de saturación de aluminio).

La diferencia de producción entre el superfosfato simple y el fosfato de Araxá, a una dosis de 87 kg de  $P_2O_5$ /ha, que inicialmente fue muy grande, con el pasar del tiempo fué desapareciendo y al tercer año no había diferencia entre las dos fuentes de P. Esto muestra que el efecto residual de la dosis de 87 kg de  $P_2O_5$ /ha aplicada en forma de superfosfato simple disminuye después del tercer año del establecimiento del pasto. A medida que se aumentaron las dosis, en el caso de 343 a 1374 kg de  $P_2O_5$ /ha, las producciones obtenidas con las dos fuentes (superfosfato simple y fosfato de Araxá) alcanzan casi los mismos rendimientos después del segundo año (Figura 1). A pesar de todo, la producción acumulada permanece superior para la fuente soluble, mostrando que una menor producción inicial, obtenida con el fosfato de Araxá, no fue compensada con el correr del tiempo (Cuadro 4).

Las producciones obtenidas con la dosis más baja de P aplicado como fosfato de Araxá no se diferencian de las obtenidas sin aplicación de P (Cuadro 4 y Figura 1). Este resultado confirma las observaciones de otros investigadores con respecto a las dosis bajas de P en forma de fosfatos

Cuadro 4. Producción acumulada de materia seca de Brachiaria decumbens durante 10 años (23 cortes), media de tres niveles de enclamiento, en respuesta a fuentes y dosis de fósforo aplicados en el primer año en un Latosol Rojo-Oscuro arcilloso del cerrado. (Sanzonowicz et al., 1987).

Fosfato	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (kg/ha)	Producción (t/ha)	Indice de eficiencia
			agronómica (IEA) (%)
Testigo (-P)	0	17.7	-
Araxá	87	17.8	1
Araxá	343	47.6	61
Araxá	1374	92.4	88
Bafsa	87	24.7	66
Bafsa	343	63.3	93
Bafsa	1374	99.9	97
Termofosfato magnésico	87	25.6	75
Termofosfato magnésico	343	64.8	97
Termofosfato magnésico	1374	109.4	108
Superfosfato simple	87	28.3	100
Superfosfato simple	343	66.5	100
Superfosfato simple	1374	102.8	100

naturales. De acuerdo con la revisión de Sanzonowicz y Goedert, (1986).

A pesar de todo, el IEA del fosfato de Araxá, en niveles más elevados de P, fue bastante alto. A una dosis de 343 kg de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/ha, el IEA fue de 61%, un índice importante para los cálculos económicos sobre la viabilidad de esa fuente de fósforo. Este dato muestra que calculado el efecto residual en un período relativamente largo, la eficiencia del fosfato natural de Araxá es superior a aquella obtenida en los primeros años. Entretanto, para una análisis económico hay que tener en cuenta la gran influencia del

establecimiento más rápido, obtenido con fuentes más solubles (Figura 1) y el hecho de que la producción acumulada final es mayor con fuentes solubles. (Cuadro 4).

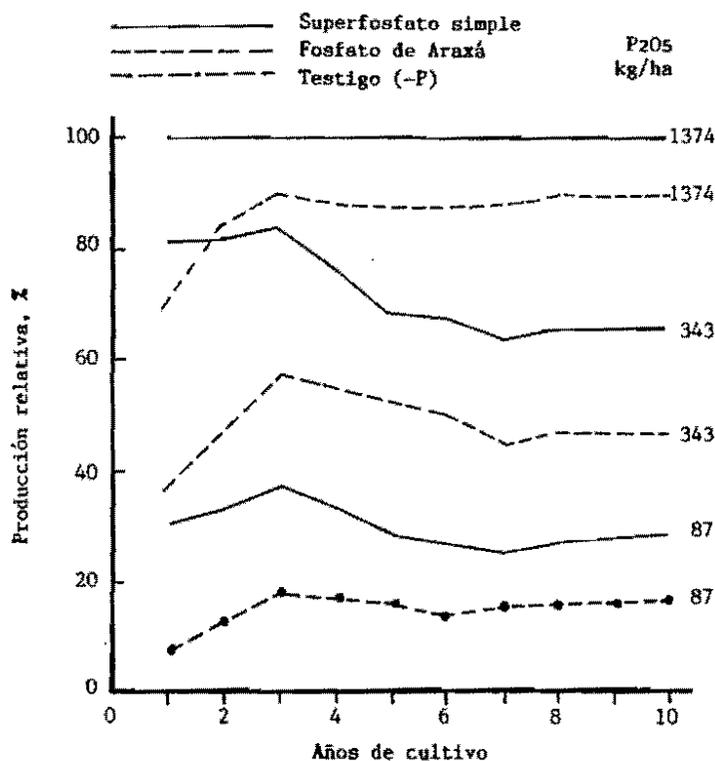


Figura 1. Producción relativa acumulada de *Brachiaria decumbens* durante 10 años, en respuesta a fuentes y dosis de fósforo, aplicadas en el primer año en un Latosol Rojo-oscuro arcilloso del Cerrado. Fuente: Sanzonovicz et al (1987).

Otros experimentos en ejecución en CPAC/EMBRAPA, con *Brachiaria humidicola* y *Andropogon gayanus* también han demostrado buenos resultados con la utilización de fosfatos naturales (Cuadro 3 y Figura 2).

En conclusión, la viabilidad de utilización de los fosfatos naturales para pastos en los Cerrados depende de un conjunto de factores agronómicos y económicos. En la mayoría de los casos, a pesar de todo, parece ser una práctica viable desde que se observen los siguientes aspectos:

- La especie forrajera debe ser de alta capacidad de absorción de fósforo y tolerante a la acidez. Las especies de braquiaria más cultivadas y el andropogon caen en esta categoría.
- Estos fosfatos tienen mayor eficiencia en suelos ácidos, arcillosos y con alta capacidad de retención de fósforo.

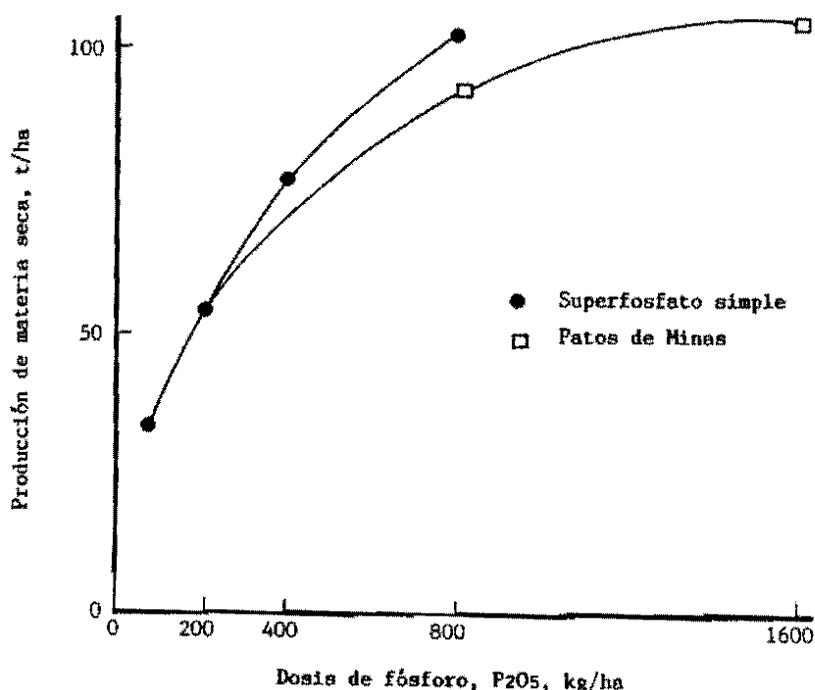


Figura 2. Producción acumulada de materia seca de *Brachiaria humidicola*, durante siete años, en respuesta a varias dosis de fósforo aplicadas en forma de superfosfato simple y fosfato natural de Patos de Minas. Los fosfatos fueron aplicados dos años antes del establecimiento del pasto en un Latosol Rojo-Amarillo arcilloso del Cerrado.  
Fuente: Souza et al. (1987).

- c) La eficiencia de esos fosfatos depende de la dosis de P aplicada, siendo muy baja con dosis bajas. En suelos arcillosos y muy pobres en fósforo disponible, dosis abajo de 80 kg de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/ha no parecen viables.
- d) Tratando de aumentar la velocidad de solubilización, el producto debe ser finalmente molido, aplicado al voleo e incorporado en el mayor volumen de suelo.
- e) Considerando un establecimiento más lento de los pastos cuando se usa solamente fosfato natural, es ventajoso hacer una fertilización inicial complementada con fuentes solubles.
- f) Si bien la viabilidad económica es específica para cada caso, el precio de una unidad de fósforo total en forma de fosfato natural a nivel de finca deberá ser inferior a la mitad del precio de la unidad de fósforo total en forma de fuente soluble (por ejemplo, superfosfato). Este índice no es absoluto en el sentido de decidir sobre el uso de una u otra fuente,

exactamente porque conforme se dijo en el ítem "e" se recomienda utilizar las fuentes en conjunto.

### **Eficiencia Agronómica de Fosfatos Solubilizados**

Teniendo en cuenta las características mineralógicas, químicas y agronómicas de los fosfatos naturales brasileños, grandes esfuerzos han sido hechos en busca de mejores alternativas de transformación para su aprovechamiento. Básicamente, se pueden agrupar esos esfuerzos en cuatro alternativas, descritas a continuación:

1. Fosfatos solubles tradicionales;
2. Fosfatos parcialmente acidulados con ácido sulfúrico;
3. Fosfatos solubilizados por otros procesos químicos; y
4. Fosfatos térmicos.

#### **Fosfatos solubles tradicionales**

Los fertilizantes fosfatados más producidos en Brasil son los superfosfatos (simples y triple) y los fosfatos de amonio (MAP y DAP). Se trata de productos solubles cuando son incorporados al suelo, con alta capacidad para liberar P para las plantas y por lo tanto, con alta eficiencia agronómica como fertilizantes fosfatados. Los dos superfosfatos han mostrado eficiencia similar en lo que concierne al abastecimiento de P para las plantas. Como el superfosfato simple contiene menor proporción de P total, esto hace que su precio por unidad de P sea mayor para el agricultor en función del costo de transporte. Esa desventaja puede ser compensada por sus efectos secundarios, debido al mayor contenido de Ca y S, hecho ya comprobado en suelos con deficiencia de estos nutrimentos o que presentan limitaciones al crecimiento radical debido en general al bajo contenido de Ca ó la elevada saturación de aluminio (Ritchey et al., 1980). Los fosfatos de amonio son igualmente fuentes eficientes de fósforo, pero no poseen Ca y S en su composición y pueden presentar la relación  $N/P_2O_5$  desfavorablemente para la utilización directa en algunos cultivos. Estas fuentes son más utilizadas en formulación de fertilizantes.

En conclusión, los superfosfatos y fosfatos de amonio son excelentes fuentes desde el punto de vista agronómico, pero tienen algunas limitaciones en el campo industrial como, tecnología relativamente compleja, necesidad de azufre y de concentrados fosfáticos con pocas impurezas ( $R_2O_3$ ). Estas dos últimas limitaciones son de gran importancia para el Brasil, que importa más del 80% del azufre que consume, y pierde aproximadamente 40% de  $P_2O_5$  extraído de las minas en la fase de concentración del mineral y eliminación de impurezas (Lobo y Silva, 1984).

### Fosfatos parcialmente acidulados con ácido sulfúrico

La producción de fosfatos parcialmente acidulados a escala industrial es muy reciente en el Brasil (cerca de 10 años) y es el resultado de la necesidad de economizar azufre y aprovechar los fosfatos naturales con alto grado de impurezas, principalmente óxidos de hierro y de aluminio. La tecnología de producción industrial es más simple que la de los superfosfatos.

Las investigaciones que tienen por objetivo evaluar la eficiencia agronómica de esas fuentes son también recientes. Una revisión de literatura (Goedert et al, 1986a) muestra que el valor medio del IEA para los fosfatos parcialmente acidulados, con una acidulación de aproximadamente 50% varía alrededor del 60% en relación con el superfosfato triple. Un trabajo más amplio fue iniciado en 1983 a través de un convenio entre la Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuaria (EMBRAPA) y la Petrobas Fertilizantes s.a. (PETROFERTIL).

La PETROFERTIL produjo los fertilizantes con cinco niveles de acidulación, a partir de rocas originarias de las siguientes localidades: Anitápolis (SC), Araxá (MG), Catalao (GO), Olinda (PE), Patos de Minas (MG) y Tapira (MG). Inicialmente, esos 30 materiales fueron evaluados en invernadero usando el millo como planta testigo (Goedert y Souza, 1986). La principal conclusión obtenida fue que la eficiencia agronómica de las fuentes se relaciona estrechamente con el porcentaje de P soluble en agua, ácido cítrico o citrato de amonio. La Figura 3 muestra la relación obtenida entre el IEA y la proporción de P extraído por solución de ácido cítrico. Se nota en la ecuación de regresión, que la relación es lineal y el gradiente es próximo a la unidad, o sea, un índice de eficiencia agronómica de magnitud similar a la proporción de P extraído por ácido cítrico, independientemente del origen de la roca. Resultados semejantes fueron obtenidos con citrato neutro de amonio.

Parte de estos materiales fueron evaluados en experimentos de campo, con un cultivo de soja. Los resultados, en la etapa de publicación, confirman los obtenidos en invernaderos, esto es, la eficiencia agronómica encontrada fue proporcional al nivel de acidulación del fosfato natural y directamente relacionada con el porcentaje de P total soluble en citrato neutro de amonio (Cuadro 5). En la Figura 4 se presentan las producciones promedias de cuatro años de un experimento de campo con soja donde fueron comparados a través de curvas de respuesta, el fosfato de Araxá parcialmente solubilizado (FAPS), con aproximadamente 50% de solubilidad cítrica, y el superfosfato triple. La eficiencia del FAPS prácticamente no varía con los cultivos

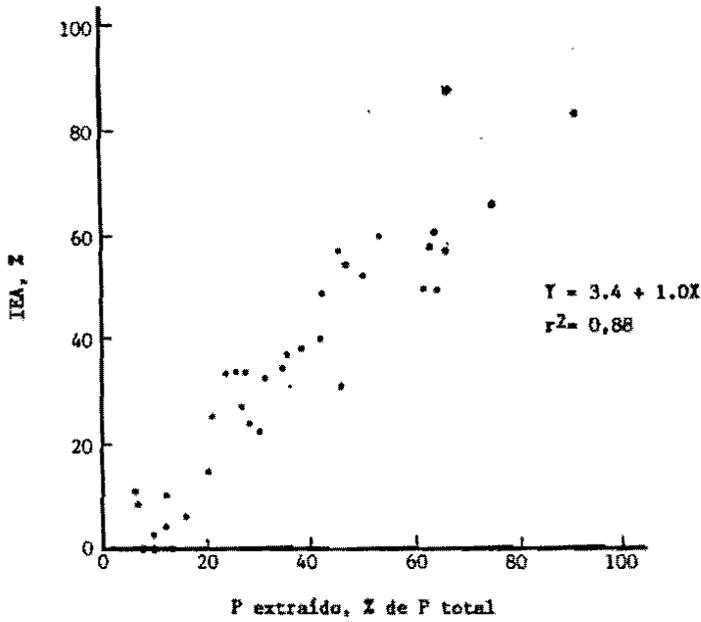


Figura 3. Relación entre el índice de Eficiencia Agronómica (IEA) de fosfatos tratados con diferentes grados de aciduación, evaluados con millo en invernadero, y la tasa de extracción de fósforo por solución de ácido cítrico 2% (relación fosfato: solución = 1:100). Fuente: Goedert & Sousa (1986).

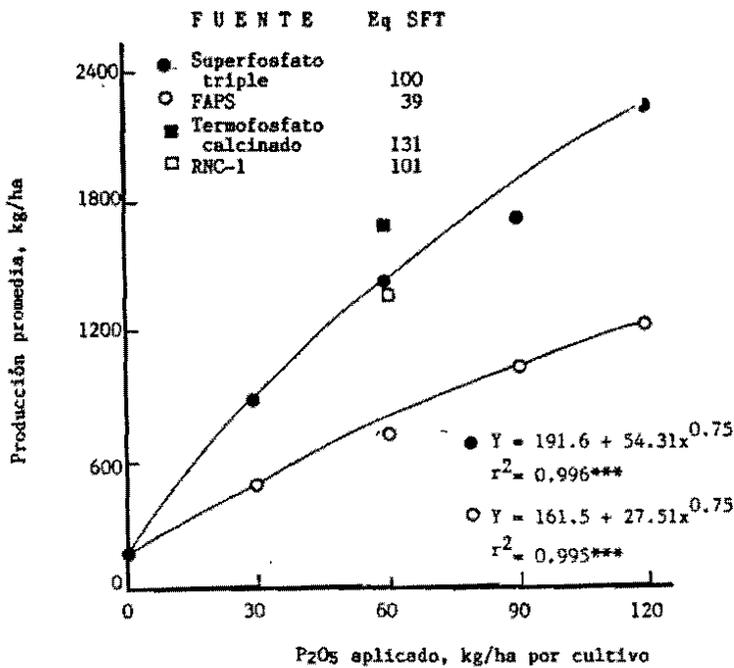


Figura 4. Producción media de soya durante cuatro años como respuesta a las fuentes y dosis de fósforo aplicadas anualmente en el surco de siembra en un Latosol Rojo-oscuro arcilloso del Cerrado. La eficiencia de los fosfatos está expresada a través del equivalente en superfosfato triple (Eq SFT %). Fuente: Goedert, W.J.; Rein, T.A. & Sousa, D.M.G. de (datos no publicados).

y la media de cuatro años fue de 39% (expresada como Eq SFT), sugiriendo que una fracción de fósforo insoluble (apatita) se comporta como el fosfato natural de origen y no es aprovechado por el cultivo en este período de tiempo.

Cuadro 5. Eficiencia agronómica de fertilizantes obtenidos por la solubilización parcial con ácido sulfúrico de fosfatos de Patos de Minas. Los fosfatos fueron aplicados al voleo apenas al primer cultivo y evaluados durante tres años con soya en un Latosol Rojo-oscuro arcilloso del Cerrado. (Goedert, Rein y Souza, datos no publicados).

Fertilizante	Acidulación (kg de ácido/t de roca)	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (%)		Equivalente en superfosfato triple		
		Total	Soluble <sup>a</sup>	1 <sup>er</sup> año (%)	2 <sup>o</sup> año (%)	3 <sup>er</sup> año (%)
Fosfato natural	-	24	3	1	4	13
Patos AS-50	50	23	13	10	11	14
Patos AS-150	150	22	24	25	31	37
Patos AS-250	250	21	43	55	45	47
Superfosfatos simples <sup>b</sup>	(3)	20	93	104	104	100

<sup>a</sup> Porcentaje de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> total soluble en citrato neutro de amonio + agua

<sup>b</sup> Obtenido a partir de otro concentrado fosfático.

Si estos resultados presentados (Figuras 3, 4 y Cuadro 5) fueran válidos para todos los suelos y cultivos anuales, se podría inferir que la viabilidad económica de estos fosfatos parcialmente acidulados en función del precio de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> soluble en ácido cítrico o citrato de amonio, no debe ser superior al precio de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> de los superfosfatos.

Se debe resaltar finalmente, que las investigaciones se han centrado en cultivos anuales, exigentes en fósforo y de crecimiento rápido. Hay indicaciones de que la situación para pastos y cultivos perennes es diferente, o sea, para esas plantas, la eficiencia agronómica de los fosfatos parcialmente acidulados deberá ser más próxima a la de los fosfatos solubles.

En resumen, el conocimiento actual sobre los fosfatos parcialmente acidulados con ácido sulfúrico permite concluir:

- a) Ellos presentan una buena opción desde el punto de vista industrial, considerando la tecnología simple, el aprovechamiento de rocas de calidad inferior y la economía de azufre;
- b) Su eficiencia agronómica, para cultivos anuales, es proporcional a la fracción soluble de P, y la parte no atacada por el ácido sulfúrico parece tener eficiencia similar a los fosfatos naturales de origen.
- c) Desde el punto de vista económico, la viabilidad de esas fuentes depende del precio vigente en el mercado. En síntesis, para cultivos anuales, el precio debe ser dado en función del P soluble en ácido cítrico o citrato de amonio y no de la proporción de P total.

#### **Fosfatos solubilizados por otros procesos químicos**

Además del ácido sulfúrico, otros acidulantes han sido evaluados para la solubilización de los fosfatos brasileros. Esas alternativas se justifican en la medida en que representen opciones de mejor aprovechamiento de algunas rocas y utilización de productos de la industria nacional como agentes solubilizantes. Actualmente, dentro del Convenio EMBRAPA/PETROFERTIL, están siendo evaluados los siguientes agentes: ácido fosfórico, ácido nítrico, nitrato de urea, fosfato de urea y bisulfato de amonio.

Investigaciones con fosfatos parcialmente acidulados con ácido fosfórico, a partir de Araxá, Catalao y Pastos de Minas fueron descritas por Barreto (1977), Franco (1977) y Ferreira y Kaminski (1979), indicando que la eficiencia de estas rocas parcialmente aciduladas también fue proporcional a la cantidad de P solubilizado por la acidulación.

La producción de nitrofosfatos es interesante para países con limitación de azufre. Tratándose, con todo, de productos con problemas de higroscopicidad e inestabilidad. Según Malavolta (1981), los nitrofosfatos no ofrecen ventajas con respecto al valor agrícola, cuando se comparan con los fosfatos de amonio. Goedert y Sousa (1986) evaluaron un fosfato de Patos parcialmente acidulado con ácido nítrico. Concluyeron que la eficiencia agronómica fue similar a los productos tratados con ácido sulfúrico, para el mismo nivel de acidulación (relación molar  $H+F_2O_3$ ). Las mezclas de fosfato natural con nitrato de urea o con fosfato de urea han sido poco eficaces en la solubilización de los fosfatos conforme se ve en el Cuadro 6.

Cuadro 6. Características químicas y equivalente en superfosfato triple (Eq SFT) promedio de fuentes de fósforo evaluadas en tres dosis y aplicadas en el surco de siembra durante cuatro cultivos con millo en un Latoso Rojo-Oscuro arcilloso del Cerrado. (Rein, Boedert, Sousa, datos no publicados).

Fertilizantes	Total			P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> soluble (% del total)			Eq SFT
	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (%)	N (%)	S (%)	CNA+H <sub>2</sub> O	Ac. cítrico	agua	Promedio
<b>Solubles</b>							
1. Superfosfato triple	49.0	...	...	94	84	82	100
2. Fosfato de urea <sup>a</sup>	43.6	17.0	...	100	100	93	121
3. Fosfonitrosulfocálcico <sup>b</sup>	18.9	7.6	11.2	89	96	42	92
<b>Parcialmente solubles:</b>							
4. Fosfato de Catalao + fosfato de urea <sup>c</sup>	39.4	6.0	...	45	41	29	44
5. Fosfato de Catalao + Nitrato de urea <sup>d</sup>	21.7	14.0	...	22	31	19	31
6. Fosfato de Patos x Bisulfato de amonio <sup>e</sup>	17.4	2.0	7.2	53	59	36	59

<sup>a</sup> H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>·CO(NH<sub>2</sub>)<sub>2</sub>

<sup>b</sup> Producto de reacción entre DAP y yeso

<sup>c</sup> 560 kg de fosfato de urea/t de fosfato de Catalao

<sup>d</sup> 880 kg de nitrato de urea/t de fosfato de Catalao

<sup>e</sup> Relaciones moleculares:Sulfato de amonio/ácido sulfúrico =  
0.5 y H+/P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>=2.3

Otro acidulante que está siendo evaluado es el bisulfato de amonio, que resulta de la mezcla de ácido sulfúrico (AS) y sulfato de amonio (SA). Varios productos obtenidos a partir de este proceso que van siendo denominados de Ruta No Convencional (RNC) fueron ensayados tratando de evaluar principalmente las relaciones moleculares  $H^+/P_2O_5$  y SA/AS. Los resultados de estos experimentos, aún no publicados, indican que ese procedimiento tiene potencial para la solubilización de rocas con alto grado de impurezas (óxidos de Fe y Al), como las de Patos de Minas. Dos productos obtenidos a partir de esta roca fueron ensayados en experimentos de campo y los resultados se presentan en la Figura 4 y el Cuadro 6. El RNC 1 (Figura 4) fue obtenido a partir de relaciones molares SA/AS = 0.3 y  $H^+/P_2O_5$  = 4.6.

El fosfonitrosulfocálcico (Cuadro 6) es un producto alternativo en el proceso de producción de fosfato de amonio, con una misma relación N/ $P_2O_5$  del DAF. Su solubilidad en agua es inferior a los fosfatos de amonio. Como fuente de P también se ha revelado un fertilizante de alta eficiencia comparado con el superfosfato triple, a pesar de la relativa baja cantidad de P total. Como las investigaciones iniciales indican, es un producto que merece más atención en el futuro.

Las investigaciones agronómicas con esos productos alternativos están en la fase inicial y no permiten conclusiones. Hasta el momento se han destacado los siguientes materiales: Fosfonitrosulfocálcico, fosfato de urea puro (Cuadro 6) parcialmente acidulado con ácido fosfórico y algunos productos del tipo RNC.

### **Fosfatos térmicos**

El tratamiento térmico de concentrados fosfáticos tiene como objetivos disminuir la rigidez estructural de la apatita y la transformación mineralógica, permitiendo la liberación de fósforo. En el proceso, el concentrado fosfático es mezclado con otros materiales, tales como: Carbonato de sodio, sulfato y silicato de magnesio, escorias industriales, etc. Diferentes mezclas caracterizan diferentes procesos y productos. Así, de modo general, los termofosfatos presentan una reacción alcalina y cuentan con cantidades apreciables de calcio, magnesio y silicio.

Las investigaciones agronómicas con termofosfatos tuvieron su inicio en el Brasil hace cerca de 20 años, principalmente con el cultivo de la caña de azúcar (Alvarez et al., 1965). A pesar de ser insoluble en agua, cuando son utilizados en forma de polvo su eficiencia ha sido igual o superior a la de los superfosfatos (Cuadro 3, 4 y Figura 4).

Otro aspecto importante de algunos termofosfatos respecto a su efecto en la elevación del pH de suelos ácidos, es su alta proporción de silicato de Ca y Mg (Goedert y Lobato, 1984). Dependiendo de la cantidad del material aplicado, ese efecto puede ser importante para la agricultura, considerándose adicionalmente el efecto nutritivo de Mg y otros nutrimentos que componen esas fuentes. Esos efectos secundarios pueden ser responsables por los valores de IEA superiores a 100% obtenidos en algunas investigaciones. Desde el punto de vista de la eficiencia agronómica, los termofosfatos son excelentes fuentes de fósforo para los suelos tropicales.

La principal limitación de esas fuentes son: Elevado precio, baja proporción de P total y que se presentan en una forma de polvo, dificultando su aplicación en el suelo.

### Conclusiones

1. Los fosfatos naturales brasileiros son de baja solubilidad y de baja eficiencia agronómica. Su aplicación directa al suelo solamente se justifica en casos de formación de pastizales y para algunos cultivos perennes;
2. Considerando los aspectos positivos en el campo industrial, los fosfatos parcialmente acidulados solamente son viables para cultivos anuales, si el costo para el productor fuera establecido en función del P soluble. A pesar de todo, esas fuentes pueden ser viables para cultivos perennes y pastos;
3. Los termofosfatos representan una excelente opción agronómica para suelos tropicales ácidos;
4. Las fuentes solubles tradicionales (superfosfato y fosfato de amonio) son eficientes, justificando su producción; y
5. Considerando la diversidad de actividades agropecuarias en la región del Cerrado brasileiro, se hace válida la producción y consumo de varias formas de fertilizantes.

## REFERENCIAS

- Alcarde, J.C. & Ponchio, C.O. 1980. Características das solubilidades das rochas fosfatadas brasileiras e termofosfato em diferentes extratores químicos. *Revista Brasileira de Ciencia do Solo*, Campinas, 4:196-200.
- Alvarez, R.; Arruda, H.V. de & Wutke, A.P.C. 1965. Adubacao de cana -de-acucar X - Experiencias com diversos fosfatos (1959-60), *Bragantia*, Campinas, 24:1-8.
- Barreio, A.C. 1977. Efeitos de acidulacao parcial, de misturas com superfosfato triplo e enxofre e da granulacao no eficiencia de fosfatos naturais. Porto Alegre. Faculdade de Agronomia UFRGS. 63p. Tese Mestrado.
- Beisiegel, W.R. & Souza, W.D. de. 1986. Reservas de fosfatos Panorama nacional e Mundial. In: Encontro Nacional, de Rocha Fosfática, 3. IBRAFOS, Sao Paulo, p. 55-71.
- Ferreira, T.N. & Kaminski, J. 1979. Eficiencia agronomica dos fosfatos naturais de Patos de Minas e Gafsa, puros e modificados por acidulacao e calcinacao. *Revista Brasileira de Ciencia de Solo*, Campinas, 3:158-62.
- Franco, M. 1977. Fosfatos parcialmente acidulados com  $H_3PO_4$ , HCl e  $H_2SO_4$  na cultura do sorgo granifero (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) em um solo de cerrado de Ituiutaba-Mg. Vicoso, Faculdade de Agronomia UFV. 1977. 75p. Tese Mestrado.
- Goedert, W.J. & Lobato, E. 1980. Eficiencia agronomica de fosfatos em solo de cerrado, *Pesquisa Agropecuaria Brasileira*, Brasilia, 15:311-8.
- Goedert, W.J. & Lobato, E. 1984. Avaliacao agronomica de fosfatos em solo de cerrado. *Revista Brasileira de Ciencia do Solo*, Campinas, 8:97-102.
- Goedert, W.J.; Rein, T.A. & Sousa, D.M.G. de. 1986a. Eficiencia agronomica de fertilizantes Fosfatados nao tradicionais, Planaltina, EMBRAPA - CPAC, 1986A, 21p. (EMBRAPA - CPAC. Documentos, 24).
- Goedert, W.J. & Sousa, D.M.G. de. 1986. Avaliacao preliminar a eficiencia de fosfatos com acidulacao parcial. *Revista Brasileira de Ciencia do Solo*, Campinas, 10:299-301.
- Goedert, W.J.; Sousa, D.M.G. de & Lobato, E. 1986b. Fósforo. In: GOEDERT, W.J. (ed.). Solos dos Cerrados: tecnologias a estratégias de manejo. Sao Paulo: Nobel;

- Brasilia: EMBRAPA, Centro de Pesquisas Agropecuária dos Cerrados, p. 129-66.
- Lobo, M.G. & Silva, R.M. 1984. Producao de Fertilizantes fosfatados. In: Anais do Simpósio sobre fertilizantes na agricultura brasileira. Espinoza, W. & Oliveira, A.J. de (eds.). Brasilia, EMBRAPA - DEF, p. 73-102.
- Malavolta, E. 1981. Adubos e edubacao fosfatada. In: Manual de química agricola - adubos e adubação. 3. ed. Sao Paulo, Ceres, p. 97-166.
- Ritchey, K.D.; Sousa, D.M.G. de; Lobato, E. & Correa, D. 1980. Calcium leaching to increase rooting depth in a Brazilian savannah Oxisols. Agronomy Journal, Madison, 72:40-4.
- Sanzonowicz, C. & Goedert, W.J. 1986. Uso de fosfatos naturais em pastagens, Planaltina, EMBRAPA-CPAC, 33p. (EMBRAPA-CPAC. Circular Técnica, 21).
- Sanzonowicz, C.; Lobato, E. & Goedert, W.J. 1987. Efeito residual da calagem e de fontes de fósforo numa pastagem estabelecida em solo de cerrado. Pesquisa Agropecuária Brasileira, Brasilia 22:233-43.
- Sousa, D.M.G. de; Sanzonowicz, C.; Miranda, J.C.C. de & Smyth, T.J. 1987. Manejo de fósforo na cultura da soja e braquiaria em Latossolo Vermelho-Amarelo (LV) de cerrado. In: Relatório Técnico Anual do Centro de Pesquisa Agropecuária dos Cerrados 1982-1985. Planaltina, EMBRAPA-CPAC, P. 115-20.

**III. Suministro de Fertilizantes Fosfatados en América  
Latina. Aspectos Económicos**

## 12. ALTERNATIVAS DE SUMINISTRO DE FERTILIZANTES FOSFATADOS. EL CASO DE COLOMBIA

Adolfo Martínez R.\*

### RESUMEN

Este documento presenta un análisis de los factores que afectan la selección entre alternativas disponibles para suplir necesidad de fósforo (P) en Colombia. Incluye un análisis comparativo de precios de fertilizantes en el mercado y de productos que se podrían producir utilizando reservas propias. Los factores que se han analizado en la selección de alternativas posibles son: 1) Volumen del mercado de fertilizantes fosfatados, 2) cantidad, calidad y localización de los depósitos, 3) disponibilidad de insumos necesarios para la producción de fertilizantes fosfatados, 4) respuesta agronómica de cultivos a diferentes fuentes de fosfatos, y 5) precios y costos de producción de fertilizantes fosfatados. Una vez analizados estos factores, el estudio concluye que, en el caso de Colombia, la producción de roca fosfórica molida, de roca fosfórica parcialmente acidulada y/o de mezclas físicas de roca fosfórica molida con fuentes solubles de P (SFT ó DAP), presentan una alternativa económicamente atractiva para suplir las necesidades de fosfatos del país. Los precios estimados a los cuales los productos manufacturados con reservas domésticas serían vendidos a los agricultores, parecen ser competitivos con los precios actuales de fertilizantes fosforados en el mercado.

### Introducción

Para los países que poseen reservas domésticas de fosfatos hay varias alternativas posibles para suplir sus necesidades de fertilizantes fosfatados. La selección entre las alternativas depende de los costos de producción, de las características agronómicas de los fertilizantes producidos, de los suelos y de los cultivos de la región.

Este documento presenta un análisis de las diferentes formas de suministrar fertilizantes fosfatados en Colombia, utilizando materiales nativos para manufacturar fertilizantes solubles como el superfosfato simple (SFS) y triple (SFT), fosfato diamónico (DAP), o fertilizantes completos (NPK), fertilizantes fosforados parcialmente

---

\*Economista Agrícola, Centro Internacional para el Desarrollo de Fertilizantes (IFDC).

solubles (parcialmente acidulados), y fertilizantes poco solubles (roca fosfórica molida, RFM).

Como se ha demostrado a través del "Proyecto Fósforo IFDC/CIAT," la roca fosfórica parcialmente acidulada (RPPA) con ácido sulfúrico puede producir resultados agronómicos similares a los del SFT o a los de cualquier otro fertilizante soluble, bajo una gran variedad de condiciones de suelos y para diferentes cultivos. La RPPA puede ser producida a un costo más bajo que el costo de producción de una fuente de fósforo soluble, principalmente debido al ahorro que se obtiene en la cantidad de ácido sulfúrico utilizada.

La RF se refiere a la simple minería y molienda del material. La producción de roca fosfórica para aplicación directa es la forma más fácil y rudimentaria de suministrar las necesidades de fosfatos a los cultivos, porque requiere poca tecnología y puede ser económica a muy bajas tasas de producción.

Para seleccionar entre las diferentes alternativas de suministro de fosfatos que un país tiene, utilizando sus recursos nativos, hay cinco factores que deben ser considerados cuidadosamente. Estos factores son:

1. Tamaño del mercado de fertilizantes fosfatados.
2. Cantidad, calidad y localización de los depósitos de los fosfatos.
3. Disponibilidad de insumos necesarios para la producción de fertilizantes fosfatados.
4. La respuesta agronómica de los cultivos a las diferentes fuentes de fosfatos.
5. Los precios de los fertilizantes y los costos de producción.

La selección sobre cual(es) fertilizante(s) fosfatado debería producir un país, debe ser hecha con base en los factores mencionados anteriormente. Este documento discute cada uno de estos factores en relación con la situación existente en Colombia.

### Tamaño del Mercado

El tamaño del mercado de fosfatos es probablemente el primer factor que debe ser considerado cuando se analizan las diferentes alternativas de suministro que un país pueda tener. Esto incluye un análisis cuidadoso del mercado

potencial tanto doméstico como foráneo. Las economías de escala juegan un papel muy importante en la determinación del tipo de planta de fertilizante que se puede justificar para desarrollo.

Un reporte reciente preparado por la comisión de fertilizantes de la FAO (1981), hace un análisis de las plantas de fertilizantes fosfatados recientemente construidas o planeadas para construcción, y muestra que la mayoría de estas plantas estarán localizadas en el sitio de la mina y tendrán una capacidad de producción de  $P_2O_5$  de entre 165.000 a 296.000 toneladas por año. Debido a la económica de escala y a consideraciones técnicas, con plantas de esos tamaños se pueden esperar costos de producción más bajos que con plantas de tamaños menores. De acuerdo con el manual de fertilizantes del IFDC (1979) plantas pequeñas de SFS pueden ser económicas y servir mercados pequeños donde haya materiales adecuados para su producción. Este manual también indica que para producción en gran escala, se prefieren plantas de SFT a plantas de SFS. Estudios realizados por el IFDC indican que la producción de RF molida y de RFFA es más rentable que el SFS, en mercados de tamaño similar.

Se estima que en Colombia en el año 2000, la demanda total de  $P_2O_5$  será igual a 159.000 toneladas, de las cuales 94.000 toneladas pueden ser producidas con la capacidad instalada actualmente (NPK, escorias y RF molida) y con la utilización planeada de la planta de molienda localizada en Pesca (Martínez, 1987). Los déficits proyectados de  $P_2O_5$  se estiman en 18.800 toneladas para 1990, 43.200 toneladas para 1995 y 65.100 toneladas para el año 2000. Esto quiere decir que para satisfacer los requerimientos fosfáticos del país hasta el año 2000, una planta, o plantas de fertilizantes, con capacidad de producción estimada total de 60.000 a 70.000 toneladas de  $P_2O_5$  por año sería necesaria. Esto es equivalente al desarrollo de una industria capaz de procesar de 300.000 a 400.000 toneladas de RF nativa anualmente.

Recientemente ha habido gran interés por parte del gobierno y de compañías privadas en el desarrollo de los depósitos fosfáticos para satisfacer las necesidades crecientes del país. En vista de este interés se llevó a cabo en 1984 un estudio de factibilidad para desarrollar un complejo de fertilizantes utilizando RF de los depósitos de Pesca y de Iza. Los resultados de este estudio indican que para producir fertilizantes con base en ácido fosfórico, era necesaria una planta con capacidad de 100.000 toneladas de  $P_2O_5$  por año y una inversión de capital estimada en 190 millones de dólares. El tamaño de esta planta se considera el mínimo para una planta de esta naturaleza; una más pequeña incrementaría los costos de producción considerablemente.

Para justificar una planta de fertilizantes fosfatados de este tamaño, el estudio de factibilidad asumía que MONOMEROS y ABOCOL, los principales productores de fertilizantes en el país, dejarían de producir fertilizantes, y que a corto y mediano plazo las necesidades de fosfatos en el país serían completamente satisfechas por este nuevo complejo de fertilizantes. Esta suposición es improbable, considerando que MONOMEROS y ABOCOL son compañías bien establecidas que esperan permanecer en el negocio de fertilizantes.

Es obvio que a los niveles presentes y proyectados de consumo de  $P_2O_5$ , y considerando la situación presente de suministro de fosfatos en el país, un complejo de fertilizantes para producir 100.000 toneladas de  $P_2O_5$  adicionales al año no está justificado.

La posibilidad de Colombia de exportar fertilizantes fosfatados es de poca importancia, dado el hecho de que MONOMEROS y ABOCOL, compañías que poseen facilidades de puerto, tienen costos de producción elevados, y sus productos no son competitivos en los mercados internacionales. Sus costos de producción son altos parcialmente porque dependen casi exclusivamente de materias primas importadas para la producción de fertilizantes.

Si una planta grande de fertilizantes se desarrolla en el país para satisfacer la demanda doméstica de fosfatos, y si los precios internacionales de fertilizantes se recuperan de su presente bajo nivel, las exportaciones de Colombia pueden llegar a ser una realidad para MONOMEROS y ABOCOL, lo que valdría la pena considerar a largo plazo, o cuando las condiciones presentes de mercado cambien. El potencial de exportación para un nuevo complejo que utilice roca fosfórica doméstica es mínimo, considerando la localización de los depósitos y su distancia (y costo de transporte) a los puertos de exportación.

En vista de esta situación y considerando el tamaño del mercado doméstico, en el año 2000 habrá necesidad en el país para una planta de fosfatos con una capacidad de producción de 60.000 a 70.000 toneladas de  $P_2O_5$ . Una planta con base en ácido fosfórico para esta capacidad sería relativamente pequeña y tendría altos costos de producción. Sin embargo, una planta para suministrar fosfatos en la forma de RF molida (lo cual ya se está haciendo) y en forma de RPPA parece ser la mejor alternativa del país.

### Cantidad, Calidad y Localización de las Reservas Domésticas

Después de que se haya hecho un cuidadoso análisis del mercado de fertilizantes, una evaluación de las reservas fosfáticas domésticas es necesario. Hay que tener presente

que la disponibilidad de RF nativa y la necesidad del mercado no aseguran el desarrollo de la industria de fosfatos. La calidad, la cantidad y la accesibilidad de la RF son factores que ameritan estudio.

El Cuadro 1 presenta un resumen de los depósitos de RF del país. De los 19 depósitos que aparecen aquí, sólo cuatro han sido estudiados e investigados lo suficiente como para tener información confiable sobre ellos. Estos cuatro depósitos son conocidos como: Pesca, Iza, Huila (Tesalia) y Sardinata. Debido a esto, la discusión que se presenta en este reporte está limitada a estos cuatro depósitos.

El Cuadro 2 presenta la composición química de muestras representativas de estos depósitos; se observa que la roca Sardinata posee el valor promedio de  $P_2O_5$  más alto (26%), seguido por las rocas de Huila y Pesca/Iza, (22%). De estas rocas, Sardinata es la única que puede ser económicamente beneficiada para aumentar su contenido de  $P_2O_5$  hasta un 32%. Con respecto al contenido de  $CO_2$ , un factor importante cuando se considera el procesamiento químico de la roca, la roca Huila tiene el contenido igual a 8.3% que es el más alto. Las rocas de Pesca/Iza y de Sardinata tienen considerablemente menos  $CO_2$ , 1.3% y 1.8% respectivamente.

En vista del volumen, calidad y localización de los depósitos, la RF de Pesca es la que ha sido más estudiada e investigada. Se considera que este depósito es el más promisorio para el desarrollo de un complejo de fertilizante relativamente grande. Un estudio conducido en 1984 indicó que la producción de SFT, DAP y productos NPK era técnicamente factible utilizando esta roca. Sin embargo, el tamaño de las reservas recuperables económicamente, no eran suficientes para justificar la inversión necesaria. Este depósito tiene la ventaja de estar localizado muy cerca a un mercado importante de fertilizantes fosfatados. Se considera que este depósito no tiene el tamaño suficientemente para mantener el desarrollo de un complejo grande de fertilizantes, sin embargo tiene suficiente RF de calidad aceptable para producir RF molida y/o de RFFA a pequeña y mediana escala que, como se mencionó anteriormente, es una alternativa económicamente viable.

El depósito de RF en Huila (Tesalia) ha sido explotado durante los últimos años para la producción de RF molida para aplicación directa. Esta es la roca más popular en el mercado utilizada por los agricultores, y la que ha recibido la mayor parte de la atención de los investigadores. Este depósito no ha sido considerado para el desarrollo de un complejo de fertilizantes debido a su bajo volumen de reservas, el cual se estima en 1.5 millones de toneladas de RF, con un contenido de  $P_2O_5$  promedio del 20%.

Cuadro 1. Reservas de Roca Fosfórica en Colombia, 1986. (Comunicación de INGEMINAS y ECOMINAS).

Localización			Espesor (m)	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (%)	Reservas* totales (10 <sup>6</sup> t)
Departamento	Municipio	Mina			
Huila	Palermo	Llano Verde	0.6-2.0	15-25	35.0
	Palermo	La Guagua	0.5-1.6	19-28	12.0
	Aipe	Media Luna	0.6-1.2	18-31	25.0
	Teruel	La Juanita	0.9-2.2	15-24	15.0 (2.5) <sup>b</sup>
	Tesalia	Tesalia	0.8-1.2	20-31	6.0
	Yaguara	Monserate	0.7-2.4	13-31	15.0
	Baraya	Pinos/Andes	0.6-2.0	11-26	30.0
N. Santander	Sardinata	Sardinata	0.5-3.5	15-37	14.4 (9.0) <sup>c</sup>
	Sardinata	Lourdes	0.5-1.5	10-30	10.0
	Mercedes	Tibu-Dru	1.0-5.4	8-19	13.0
	Gramalote		0.5-3.8	10-27	7.7
Santander	Azufrada	Azufrada	0.7-2.0	10-29	32.7
Boyacá	Sogamoso	P. Negra	0.5-1.6	11-27	39.0
	Sogamoso	Siscuenci	0.7-1.0	15-20	20.0
	Sogamoso	El Pilar	0.8-1.6	17-26	15.0
	Iza	Iza	0.6-2.4	10-23	36.0 (13.0)
	Cuitiva	Cuitiva		8-23	
	Pesca	Conejera	1.0-4.2	17-25	30.6 (6.5)
Tolima	Pandi	Tolima	1.6-2.7	16-23	10.0

a. Reservas totales son la suma de reservas probadas, probables, posibles e inferidas.

b. Reservas recuperables estimadas a precios actuales.

c. Se estima que sólo hay de 1.5 a 2.0 millones de toneladas de material con P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> > 28%.

Cuadro 2. Características químicas de las principales RF colombianas. (IFDC y Comunicaciones de ECOMINAS).

Mina	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (%)	CaO (%)	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	MgO (%)	CO <sub>2</sub> (%)	F (%)	SiO <sub>2</sub> (%)	Na <sub>2</sub> O (%)	K <sub>2</sub> O (%)	SO <sub>3</sub> (%)
Pesca/iza	22	28	1.0	1.4	0.15	1.3	2.1	40.3	0.14	0.15	0.45
Huila	22	40	0.6	1.7	0.17	8.3	2.7	23.6	0.16	0.09	0.95
Sardinata	26	33	1.9	5.0	0.22	0.8	2.6	25.3	0.10	0.15	-

Obviamente esta mina, ofrece una buena oportunidad para continuar la producción de RF y también tiene potencial para la producción de RFPA, para lo cual tiene la ventaja de estar localizada cerca a una planta de ácido sulfúrico y a una importante área agrícola potencial usuaria: el área arroceras del Huila y Tolima.

La roca fosfórica de Sardinata ha sido utilizada en el pasado por MONOMEROS y ABOCOL en la producción de fertilizantes NPK. Esta utilización ha estado limitada a unos pocos miles de toneladas por año, en parte debido a limitaciones de producción y en parte debido al alto costo y falta de transporte de la mina a las plantas de fertilizante.

En años recientes esta roca ha sido utilizada para aplicación directa. Esta roca tiene la ventaja de un alto contenido de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (32%), pero está en desventaja por la distancia a que está de los mercados potenciales y por su baja reactividad agronómica. Las reservas recuperables de esta mina, que se estiman en 2 millones de toneladas, hacen posible el desarrollo de una industria de RF y de roca parcialmente acidulada en pequeña escala, y también para la producción de materias primas para MONOMEROS y ABOCOL, pero no es lo suficiente para mantener el desarrollo de un complejo grande de fertilizantes. Con respecto a la posible producción de RFPA, las plantas productoras de ácido sulfúrico están localizadas lejos de esta mina, lo cual aumenta el costo de transporte. ECOMINAS está interesada en

desarrollar una planta de fosfato bicálcico para alimento animal en esta mina.

En resumen, considerando la cantidad, calidad y localización de las reservas domésticas, se puede decir con cierta seguridad de que actualmente no hay suficiente roca en ningún sitio de la calidad y en la cantidad adecuada para mantener el desarrollo de un complejo de fertilizantes grande. Por otro lado los depósitos considerados aparentemente son accesibles y tienen suficiente roca fosfórica, de calidad aceptable como para permitir el desarrollo de la industria de RF molida y/o de RFFA.

### Disponibilidad de Insumos Necesarios para la Producción de Fertilizantes

Debido al papel importante que juegan el azufre y el ácido sulfúrico en la producción de fertilizantes en general, y el de fertilizantes fosfatados en particular, es importante analizar su disponibilidad y uso en el país.

Actualmente hay dos fuentes de azufre doméstico en el país, una es la mina de Puracé en el departamento del Cauca y la otra es el azufre subproducto de la industria del petróleo en Barrancabermeja, Santander. Además de la mina en Puracé hay pequeños depósitos de azufre en los departamentos de Nariño, Tolima y Cundinamarca. Sin embargo, muy poco se sabe sobre estos depósitos, ninguno de los cuales está siendo explotado actualmente.

El depósito de Puracé está localizado a 50 km al este de Popayán, en la vecindad del pueblo de Puracé, y tiene reservas estimadas en 2 millones de toneladas, que son las más grandes del país. Durante 1984-85 la producción total de azufre de la mina de Puracé fue igual a 35.000 toneladas, equivalente al 100% de la capacidad de la planta. Puracé está en la etapa de estudio y planeación para la expansión de su planta. Dependiendo de los estudios de las reservas, Puracé tiene planes de doblar su capacidad de producción. ECOPEPETROL, en Barrancabermeja, la otra fuente de azufre en el país, produce 15.000 toneladas por año.

Las necesidades totales de azufre en el país durante 1986 fueron estimadas en 75.000 toneladas, de las cuales 50.000 toneladas son producidas localmente por PURACE y ECOPEPETROL y 25.000 toneladas son importadas, principalmente por MONOMEROS. Si Puracé expande su planta al nivel planeado, las importaciones de azufre no serían necesarias.

El Cuadro 3 presenta una lista de los productores de ácido sulfúrico, su localización, capacidad de producción, y producción total durante 1984-85. Este Cuadro muestra que

sólo una planta, la de Química Básica en Caloto, Cauca estaba operando su capacidad completa y que el país tiene una capacidad total de producción de ácido sulfúrico de 182.400 toneladas por año y una demanda de sólo 121.200, o sea 67% de la capacidad instalada.

Cuadro 3. Plantas de producción de ácido sulfúrico, 1985-86. (Comunicación de Química Básica).

Compañía	Localización	Capacidad (t/año)	Producción
			1985-86 (t/año)
MONOMEROS	Barranquilla	86,400	47,400
PQP	Bogotá	28,800	13,800
FAS	Neiva	12,000	9,000
ECOPETROL	Bucaramanga	25,200	21,600
Química Básica (QB)	Caloto, Cauca	<u>30,000</u>	<u>30,000</u>
Total		182,400	121,800

El Cuadro 4 presenta el uso de ácido sulfúrico por región durante 1984-85. Aquí se puede ver que MONOMEROS en Barranquilla es el usuario más grande del país seguido de ECOPETROL y Química Básica. MONOMEROS produce 100% de sus necesidades para producción de caprolactama, mientras que ECOPETROL produce 95% de sus necesidades. Química básica, PQP, e IFAS, producen ácido sulfúrico para la venta a otras industrias. Las plantas de PQP, FAS y Química Básica producen ácido sulfúrico utilizando azufre de la mina de Puracé. MONOMEROS utiliza aproximadamente 21.500 toneladas de azufre importado y 8.000 toneladas del material de Puracé. La planta de ECOPETROL utiliza exclusivamente el azufre subproducto de la industria del petróleo.

Con respecto a la disponibilidad de ácido sulfúrico en la proximidad de las minas de RF, la fábrica de FAS construida en 1975, está localizada aproximadamente a 40 km de la mina de RF de Tesalia en el Huila. Esta planta fue originalmente construida con la intención de utilizar el ácido sulfúrico y producir roca parcialmente acidulada o SFS. Actualmente existe la posibilidad de utilizar la producción de ácido de la fábrica de FAS para acidular roca del Huila. La planta de Química Básica en Caloto, Cauca, está localizada en la

Cuadro 4. Uso de ácido sulfúrico por región, 1985-86. (Comunicación de Química Básica).

Región	Fabricante	Uso (t/año)
Costa Atlántica	MONOMEROS y otros	36,600
Antioquia	MONOMEROS, P&P, QB	18,000
Bogotá	P&P y FAS	13,200
Barrancabermeja	ECDPETROL y MONOMEROS	22,800
Valle	QB	26,400
Neiva	FAS	<u>4,800</u>
Total		121,800

proximidad de la mina de Puracé y más o menos a unos 200 km de la mina de Tesalia. Esta planta está operando a toda su capacidad y actualmente no tiene exceso de ácido sulfúrico que pudiera ser utilizado para acidular roca. Sin embargo, Química Básica está considerando una expansión de la planta en el futuro cercano para producir 10.000 toneladas adicionales, algunas de las cuales podrían ser utilizadas en la acidulación de roca fosfórica. La planta de P&P localizada en Bogotá actualmente está operando al 50% de su capacidad. Esta es la posible fuente de ácido sulfúrico más cercana a las minas de Pesca, Iza y Sardinata para acidular la roca de alguna de estas tres minas.

En conclusión, Colombia aparentemente tiene suficientes reservas de azufre, y con la expansión planeada por Química Básica, debería tener suficiente material terminado para llegar a ser autosuficiente. Con respecto al ácido sulfúrico, el país tiene exceso de capacidad de producción, con lo cual el país tendría asegurado el desarrollo eventual de una industria de fosfatos de tamaño pequeño o mediano.

#### Respuesta Agronómica de los Cultivos a Diferentes Fuentes de Fosfatos

Investigaciones realizadas por el Proyecto Fósforo IFDC/CIAT y por el ICA han mostrado que la RF, la RPPA o mezclas de SFT y RF, las cuales simulan una RF parcialmente acidulada, pueden ser utilizadas eficientemente como fertilizantes en una gran variedad de cultivos y regiones agroclimáticas del

país. También se ha demostrado que el uso de RF molida como fertilizante de aplicación directa está limitado a unos pocos cultivos y regiones agroclimáticas y que la RFH puede ser utilizada como corrector del suelo en grandes áreas.

En vista de estos hechos, se ha dicho que la RF molida y la RFFA pueden proveer la mayoría de las necesidades de fosfatos del país. La ventaja de estos dos productos sobre fuentes solubles estándar de fósforo en el suministro de las necesidades de P, es su menor costo de inversión y más bajo costo de producción.

### Precios de los Fertilizantes y Costos de Producción

El Cuadro 5 presenta los precios promedios en planta para los principales fertilizantes utilizados en el país durante el periodo 1977-87. Los fertilizantes incluidos en este Cuadro proveen aproximadamente el 75% del total de P usado en el país. Para convertir estos precios a precios pagados por los agricultores, se adiciona un 8% de margen para intermediarios y el costo de transporte. Este Cuadro muestra que los precios actuales aumentan anualmente y que las disminuciones que ocurren son ocasionales. Estas variaciones reflejan cambios en los precios internacionales, la devaluación actual del peso y la inflación. Los mayores incrementos del precio se observaron durante los periodos 1980-81 y 1983-85.

Cuadro 5. Precios (miles de pesos/t) para fertilizantes en planta. (Comunicación de ABCOL).

Año	Urea	DAP	KCl	10-30-10	13-26-6	15-15-15	17-6-18
1977	7400		5600	7800	8600	6300	
1978	10700		7800	7800	8600	6700	
1979	11300	11900	7800	8500	9900	7400	10100
1980	15300	16800	9100	14800	14800	11230	12500
1981	18600	19500	16800	19400	17100	15200	15900
1982	21000	21500	17600	20000	18200	15700	16100
1983	19500	21500	18500	20900	19500	17500	18000
1984	27600	33700	23200	27000	25800	22400	19100
1985	36300	43500	26500	36000	37600	30900	29200
1986	34000	48000	28000	46500	44600	38900	39200
1987	30000	55000	28000	48200	46300	40400	40700

El Cuadro 6 presenta un estimativo de los precios actuales y reales en planta para N,  $P_2O_5$  y  $K_2O$  durante el período 1975-85. Estos estimativos son promedios ponderados de los fertilizantes vendidos en el país. Como este Cuadro indica los precios tienden a un incremento en términos actuales pero en términos reales se han mantenido relativamente estables. El  $K_2O$  es el nutrimento de precio más bajo, mientras que el N y el  $P_2O_5$  se alternan los precios más altos. Durante 1985, último año con información disponible para este estimativo, el  $P_2O_5$  tuvo el precio más alto (actual y real).

Cuadro 6. Precios promedios (\$/kg) de nutrimentos en Colombia, 1977-85. (Derivado de datos suministrados por ABOCDL e ICA).

Año	Actual			Real (1975 = 100)		
	N	$P_2O_5$	$K_2O$	N	$P_2O_5$	$K_2O$
1975	10.6	12.0	19.9	10.6	12.0	19.9
1976	10.6	18.3	12.0	18.4	14.4	9.5
1977	16.1	18.7	10.2	9.9	11.5	6.3
1978	23.1	15.9	9.6	12.4	8.6	4.8
1979	24.5	18.4	10.9	10.8	8.2	4.7
1980	33.6	33.9	19.8	11.5	11.4	7.1
1981	40.6	37.9	31.7	11.5	10.8	8.7
1982	45.7	37.3	29.5	10.3	8.4	6.7
1983	42.8	43.1	35.1	8.1	8.3	6.7
1984	59.8	56.5	36.2	9.5	9.0	5.7
1985	79.4	84.6	48.2	10.6	11.3	6.5

### Precios y Costos de Transporte

Los precios de los fertilizantes pagados por los agricultores en diferentes regiones del país varían ampliamente dado la diferencia en los costos del transporte. Obviamente, los agricultores cercanos a las plantas de fertilizantes pagan precios más bajos. Agricultores que le

compran a la Caja Agraria pagan el mismo precio en todo el país. Se estima que los costos actuales de transporte representan entre el 15% y el 25% del costo total de los fertilizantes simples y compuestos. Para la roca fosfórica, siendo este un producto de menor precio, los costos de transporte representan un 30% a 35% del precio de venta.

El Cuadro 7, presenta los precios estimados de los principales fertilizantes fosfóricos del país en planta (Barranquilla/Cartagena), en Bogotá (Cundinamarca/Boyacá), Pasto (Nariño) y Villavicencio (Llanos Orientales). Bogotá y Pasto son las dos zonas más importantes en donde se utilizan fertilizantes fosfóricos, mientras que Villavicencio representa la zona de mayor potencial para el incremento en el uso de roca fosfórica para aplicación directa y de RFFA.

Cuadro 7. Precios de fertilizantes y de  $P_2O_5$  en la planta y en centros importantes de consumo, marzo 1987. (Comunicación de MONOMEROS, ABOCOL, FOSFACOL y ECOMINAS).

Producto	Planta		Villavicencio		Pasto		Bogotá	
	Producto	$P_2O_5$	Producto	$P_2O_5$	Producto	$P_2O_5$	Producto	$P_2O_5$
	(\$/t)	(\$/kg)	(\$/t)	(\$/kg)	(\$/t)	(\$/kg)	(\$/t)	(\$/kg)
DAP	55000	94	68900	114	65400	110	67400	112
SFT	45000	98	58100	126	54600	119	56600	123
10-30-10	48200	123	61600	153	63100	162	60100	150
13-26-06	46300	135	59500	168	61000	179	58000	165
15-15-15	40400	157	53100	197	54600	220	51600	193
R.F. Huila	10300	47	16700	76	17200	78	15700	71
Urea	30000	65	41900	91	38400	83	40400	88
KCl	28000	47	39700	66	36200	60	38200	64

El Cuadro 7 presenta también los precios estimados para fertilizantes y un estimativo del precio de  $P_2O_5$  en cada producto. El precio del  $P_2O_5$  fue calculado descontando el valor de N y  $K_2O$  utilizando los precios de Urea y KCl, señalados en el Cuadro. Los precios del P en DAP y SFT son

más altos en el área de Villavicencio, seguido por Bogotá y Pasto. Los precios del P de los productos NPK, son más altos en Pasto, seguido por Bogotá y Villavicencio. Los precios más bajos del P en los productos importados ocurren en Pasto, debido a que su importación se hace algunas veces a través del Puerto de Buenaventura, disminuyendo así los costos de transporte.

Como se muestra en el Cuadro 7, el  $P_2O_5$  es actualmente más costoso que el N y el  $K_2O$ . Entre las fuentes de P consideradas, la roca fosfórica del Huila tiene el costo más bajo (\$71 a \$76/kg), mientras que el 15-15-15 tiene el más alto (\$193 a \$220/kg).

El Cuadro 8 presenta los costos de transporte desde las principales áreas (presentes y potenciales) suministradoras de P en el país, a las tres áreas de mayor utilización, así como también un estimativo del ahorro potencial de transporte de la roca fosfórica de Tesalia (Huila) y de la Planta de Pesca/Iza a los centros de consumo. Como se indica en ese Cuadro, se pueden obtener ahorros considerables en el transporte, suministrando fertilizantes fosfóricos de Iza/Pesca y Sardinata a la zona de Cundinamarca/Boyacá y a los Llanos Orientales y abasteciendo a las zonas de Nariño y Llanos Orientales desde Tesalia (Huila), en lugar de traer productos importados o fertilizantes NPK desde las plantas de Barranquilla/Cartagena. Sardinata goza de una pequeña ventaja en relación con la Costa Atlántica, pero tiene costos de transporte mayores a las áreas de mercado, que los productos provenientes de otras minas.

Para abastecer la zona de Bogotá, los productos podrían ser manufacturados en Iza/Pesca, y tener una ventaja cercana a \$3.400/tonelada sobre los productos provenientes de Tesalia, en tanto que Tesalia tiene una ventaja de cerca de \$1.800/tonelada en el suministro de productos al área de Nariño. Con respecto a la zona de los Llanos Orientales, Iza/Pesca tiene una ventaja de \$1.400/toneladas sobre Tesalia. Además si se construye en el futuro la nueva carretera a los Llanos Orientales, esta ventaja será mayor.

### **Tamaño de la Planta de RPPA y Costos de Producción**

El Cuadro 9 presenta un costo de producción estimado de RPPA utilizando material proveniente de una de las minas consideradas y localizadas en uno de los tres posibles lugares: Tesalia, Pesca/Iza, y Sardinata. Para cada producto producido, aproximadamente el 50% del  $P_2O_5$  es soluble en agua. Los costos de minería de la roca fosfórica y del  $H_2SO_4$  fueron estimados a partir de la información suministrada por los productores. El costo de conversión se

asumió que era igual en todas las localidades e igual al 80% del costo fijo y variable estimado por el IFDC (Schultz, 1986). Esto se hizo, considerando los costos locales para servicios, construcción y operación de una planta de granulación de tamaño similar (20.000 toneladas/año de  $P_2O_5$ ).

Cuadro 8. Costos estimados (\$/t) de transporte de fertilizantes a los principales mercados, marzo 1987.

De	A	Costo	Ventaja sobre Costa Atlántica	Ventaja sobre Tesalia
Costa Atlántica	Bogotá	8,000		
Costa Atlántica	Pasto	11,000		
Costa Atlántica	V/cencio	9,500		
Tesalia	Bogotá	4,400	3,600	
Tesalia	Pasto	5,900	5,100	
Tesalia	V/cencio	5,400	4,100	
Pesca/Iza	Bogotá	1,000	7,000	3,400
Pesca/Iza	Pasto	8,000	3,000	(2,100)
Pesca/Iza	V/cencio	4,000	5,500	1,400
Sardinata	Bogotá	4,500	3,500	(100)
Sardinata	Pasto	11,000	0	(5,100)
Sardinata	V/cencio	7,500	2,000	(2,100)

Se seleccionó una planta de granulación con capacidad de 20.000 toneladas de  $P_2O_5$ /año, considerando el uso potencial de este producto a corto y mediano plazo.

Se estima que la RFFA pueda sustituir las importaciones de DAP, al menos parcialmente. La evaluación agronómica de la RFFA indica que ésta puede ser tan efectiva como el SFT y el DAP en algunos suelos y cultivos. En suelos y cultivos en

Cuadro 9. Costo estimado de producción para RFFPA.

Roca	Cantidad <sup>a</sup>		Costo <sup>b</sup>		Sub- Total (\$/t)	Costo de Conversión <sup>c</sup> (\$/t)	Costo Total (\$/t)	Contenido P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (%)
	Roca (kg/t)	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (kg/t)	Roca (\$/t)	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (\$/t)				
Huila	758	210	1516	5250	6766	11304	18070	16.7
Pesca/Iza	816	144	1632	4320	5952	11304	17256	18.0
Sardinata	810	181	405	6335	6740	11304	18044	21.0

a. Cantidades de roca y H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (del 93%) necesarias para producir una tonelada métrica de RFFPA.

Estimados del IFDC.

b. Estimado utilizando los siguientes costos de minería y transporte de roca sin moler, a la planta:

Huila, Pesca e Iza: \$200/tonelada

Sardinata: \$500/tonelada

Los costos del H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (93%) son: en Huila: \$25,000/tonelada

en Pesca/Iza: \$30,000/tonelada

en Sardinata: \$35,000/tonelada

c. Costo de conversión estimados de: Schultz, 1986.

donde los fertilizantes solubles son mejores agrónomicamente, un incentivo en el precio animaría a los agricultores a cambiar de producto. Por tanto, se estima que una planta para producir unas 20,000 toneladas de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/año sería suficiente en el corto o mediano plazo. A largo plazo, a medida que aumente el mercado para RFFPA y los agricultores conozcan mejor este producto, podría pensarse en la construcción de otra planta de tamaño similar.

El Cuadro 10 presenta los costos estimados de producción de la RFFPA en las tres localidades seleccionadas. Este Cuadro indica que el costo más bajo estimado corresponde a la acidulación de la roca fosfórica de Pesca/Iza, el cual es de \$17.256/tonelada, mientras que el más alto corresponde a la roca del Huila, en Tesalia, cuyo costo es de \$18.070/tonelada. Con respecto al contenido de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> de la RFFPA, la roca de Sardinata contiene el mayor porcentaje

(21%), mientras que la roca de Huila tiene el más bajo contenido de  $P_2O_5$  (16.7%). Como se establece en el Cuadro 10, el costo de producción de  $P_2O_5$  más bajo se obtiene con la roca de Sardinata (\$86/kg), seguido por la de Pesca/Iza (\$96/kg), y finalmente la de Huila (\$108/kg).

Cuadro 10. Costo de RFPA en planta y en varios mercados.

RFPA	Planta		Villavicencio		Pasto		Bogotá	
	Producto (\$/t)	$P_2O_5$ (\$/kg)	Producto (\$/t)	$P_2O_5$ (\$/kg)	Producto (\$/t)	$P_2O_5$ (\$/kg)	Producto (\$/t)	$P_2O_5$ (\$/kg)
Huila	18070	108	24916	149	25415	152	23915	143
Pesca/Iza	17256	96	22636	126	26636	148	19636	109
Sardinata	18044	86	26988	129	30488	145	23988	114

El Cuadro 10 muestra también el costo estimado por producto y del  $P_2O_5$  en planta, y los precios de venta estimados en Villavicencio, Pasto, y Bogotá. Estos precios fueron estimados, adicionando 8% de margen para los intermediarios y el costo de transporte. Para el  $P_2O_5$ , la RFPA de Pesca/Iza tiene el precio más bajo en las zonas de Bogotá y Villavicencio (\$126/kg y \$109/kg, respectivamente), la RFPA de Sardinata muestra el precio más bajo en Pasto (\$145/kg). Podría considerarse que si se forma una compañía entre los productores de roca y de ácido, este ácido tendría el precio más bajo, puesto que las ganancias se establecerían únicamente en el producto final. Por consiguiente, los costos de producción serían más bajos que los aquí presentados.

De las anteriores consideraciones se puede establecer que las minas estudiadas tienen costos similares de producción. Sin embargo, las plantas localizadas en Tesalia y/o Pesca (utilizando roca de Iza y Pesca) tienen una ventaja sobre Sardinata, puesto que esas plantas tienen mayores facilidades de trituración, secado y empaclado actualmente en operación. Sardinata requiere una mayor inversión inicial de capital. Además, la escasez de transporte en la región, encarece este rubro.

Los costos de producción presentados son preliminares y para tomar una decisión final es necesario un estudio de factibilidad para determinar el sitio o sitios óptimos de la(s) planta(s) para producir RFPA. En un estudio de ingeniería podría igualmente considerarse la localización de la planta(s) de RFPA en la cercanía de las plantas de  $H_2SO_4$  con el fin de minimizar los problemas relacionados con el transporte del ácido. Para este propósito podría considerarse la localización de las plantas en Neiva-Huila (planta de FAS), Caloto-Cauca (planta de Química Básica), y Bogotá (planta de PQF).

### Competitividad en el Mercado de la RFPA

El Cuadro 11 presenta los precios estimados de la RFPA en Villavicencio, Pasto, y Bogotá. Como muestra este Cuadro, los precios estimados para  $P_2O_5$  de los productos RFPA son mayores que los estimados para el DAP, pero a su vez más bajos que los de los NPK. La única excepción a esto es el precio de la RFPA de Pesca en Bogotá (\$109/kg) el cual es ligeramente menor que el precio del DAP (\$112/kg). Los precios más bajos de las RFPA son a su vez mayores entre un 10% y un 30% que los correspondientes al DAP en el área de Villavicencio, entre 32% a 53% mayores en el área de Pasto, y entre 3% (menor) y 28% (mayor) en el área de Bogotá.

Cuadro 11. Precio estimado de  $P_2O_5$  de diferentes productos en varios sitios.

Producto	Villavicencio		Pasto		Bogotá	
	Precio (\$/kg)	%	Precio (\$/kg)	%	Precio (\$/kg)	%
DAP	114	100	110	100	112	100
SFT	126	111	119	108	123	110
10-30-10	153	134	162	147	150	134
13-26-06	168	147	179	163	165	147
15-15-15	197	173	220	200	193	172
RFPA Huila	149	131	152	138	143	128
RFPA Iza/Pesca	126	111	148	135	109	97
RFPA Sardinata	129	113	145	132	114	102
RF Huila	76	67	78	71	71	63

El cuadro 11 indica también que los precios del  $P_2O_5$  de los productos NPK en el área de Villavicencio son, entre un 21% a 37%, más altos que el precio de la RFFPA de Pesca/Iza, y entre el 12% y 52% mayores que el precio de la RFFPA de Sardinata en el área de Pasto, y entre un 38% y 77% mayores que el precio de la RFFPA de Pesca en el área de Bogotá.

En consecuencia, la RFFPA puede ser una fuente de F competitiva en el mercado. Debido a que el DAP tiene un menor precio, será el fertilizante preferido por los agricultores. Sin embargo, los agricultores de papa, el mayor grupo consumidor de F en el país, han tenido malas experiencias con el uso de DAP en sus cultivos (quemadura de retoños), y continúan utilizando fertilizantes NPK. Su aversión al uso de DAP ha impedido el desarrollo de una industria de mezclas a granel en las regiones productoras de papa en el país.

Es bien conocido que los precios internacionales de los fertilizantes, incluyendo las fuentes de F, están a su más bajo nivel por muchos años. Se espera que dichos precios permanezcan bajos a corto y mediano plazo, y luego se incrementen lentamente. Con la recuperación de los precios, los productores de DAP y SFT perderán algunas de sus ventajas, y la fabricación de RFFPA será más competitiva. De incrementarse los precios internacionales de los fosfatos (SFT y DAP) en un 20%, o si alcanzaran el nivel de 1980-81, el precio estimado de  $P_2O_5$  será aproximadamente igual al calculado aquí para la RFFPA. Por lo tanto, se calcula que en el mediano y largo plazo, la RFFPA competirá favorablemente con las importaciones de DAP y SFT. Además, puesto que los productos NPK son fabricados con materia prima en su gran mayoría importada, las ventajas de la RFFPA con relación a ellos también será mayor.

#### **Costos de Producción de Mezclas de Roca Fosfórica y SFT/DAP**

El Cuadro 12 presenta el costo estimado para los agricultores de la mezcla de un SFT o DAP con roca fosfórica Huila. Esta mezcla ha sido experimentada agrónomicamente por el proyecto IFDC/CIAT con notables resultados, comparables a los de la RFFPA. La mezcla contiene al igual que la RFFPA, el mismo porcentaje (50%) de  $P_2O_5$  soluble en agua. El Cuadro 12 indica que la combinación de la roca fosfórica del Huila y el TSP o DAP tiene un costo menor que el TSP o DAP en los tres lugares seleccionados, y costos más altos que la roca del Huila sola. Se puede concluir que en los lugares donde esta mezcla es tan efectiva como el SFT o DAP, su uso es económico para los agricultores.

La mezcla ensayada está constituida por productos con granulometría similar (ambos pulverizados), mezclados

inmediatamente antes de su aplicación a los suelos. Por lo tanto, los agricultores con acceso a mano de obra barata o con sobrante de ella al momento de la siembra, pueden lograr con esta práctica grandes beneficios.

Cuadro 12. Costo estimado de insumos para mezclas de RF y SFT.

Producto	Villavicencio		Pasto		Bogotá	
	Producto (\$/t)	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (\$/kg)	Producto (\$/t)	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (\$/kg)	Producto (\$/t)	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (\$/kg)
RF Huila	16700	76	17200	78	15700	71
SFT	58100	126	54600	119	56600	123
Mezcla	30072	101	29280	98	28911	97
FDA	68900	114	65400	110	67400	112
Mezcla	33560	95	32769	94	32399	92

La idea de hacer un producto comercial con esta mezcla no parece atractiva, puesto que el SFT y/o DAP (o MAP) deberían estar finamente molidos antes de mezclarlos con la roca, lo cual incrementaría el costo del producto. Los costos se incrementarían aún más si esta mezcla se granula. La compactación no es recomendable para productos que contengan roca fosfórica y/o SFT (Lupin y Le, 1983). Sin embargo, un estudio detallado de factibilidad para producir estas mezclas en las fincas de los agricultores, podría dirigirse hacia la evaluación de diferentes mezclas con RF de las diferentes minas.

## REFERENCIAS

- FAO. 1985. Investments and Production Costs for Fertilizers, Fert. 85/4, FAO, Rome, Italy.
- IFDC. 1979. Fertilizer Manual, IFDC-R-1, Muscle Shoals, AL 35662, U.S.A.
- Lupin, M.S. y D.N. Le. 1983. Compactación IFDC T-25, Muscle Shoals, Alabama, U.S.A.
- Martínez, A. 1987. El sector de fertilizantes fosfatados en Colombia. Alternativas de suministro y políticas opcionales, IFDC, Muscle Shoals, AL 35662, U.S.A. (Mimeo).
- Schultz, J.J. 1986. "Sulfuric Acid-Based Partially Acidulated Phosphate Rock. Its Production, Cost and Use", IFDC T-31, Muscle Shoals, Alabama 35662, U.S.A., p. 20.

### 13. USO POTENCIAL DE ROCAS FOSFORICAS Y DE ROCAS FOSFORICAS PARCIALMENTE ACIDULADAS EN LA AGRICULTURA COLOMBIANA

Adolfo Martínez<sup>a</sup>  
Luis A. León<sup>b</sup>  
Jaime Navas<sup>c</sup>

#### RESUMEN

En 1977 el IFDC, con ayuda económica del CIID del Canadá, iniciaron el llamado "Proyecto Fósforo". El objetivo general de este proyecto está relacionado con investigación dirigida a identificar prácticas de fertilización en suelos ácidos e infértiles de América Tropical, utilizando recursos nativos de la región. Debido a que el fósforo es el nutriente limitante más importante de la región, el proyecto ha dedicado gran parte de sus recursos a identificar prácticas y materiales nativos para solucionar este problema. Las actividades del proyecto han sido llevadas a cabo con la colaboración y apoyo del "Instituto Colombiano Agropecuario" (ICA). Este documento presenta en forma de resumen los resultados de la evaluación agronómica y económica de diferentes fuentes de P en varios cultivos y bajo diversas condiciones agro-climáticas de Colombia. A través del trabajo realizado por el proyecto se han identificado prácticas de aplicación (método y tiempo de aplicación), y fuentes de P (roca fosfórica molida y roca fosfórica parcialmente acidulada), las cuales pueden ser utilizadas por los agricultores y obtener beneficios económicos similares a aquellos obtenidos con fertilizantes convencionales (Super Fosfato Triple, Fosfato Di-Amónico y productos NPK). Este documento identifica en el país, en forma general, cultivos y áreas agro-climáticas homogéneas, donde diferentes fuentes de P producidas con materiales domésticos, pueden ser utilizadas efectivamente por agricultores.

-----  
<sup>a</sup>Economista Agrícola, International Fertilizer Development Center.

<sup>b</sup>Científico de Suelos, International Fertilizer Development Center.

<sup>c</sup>Director, Programa Nacional de Suelos, ICA, Bogotá, Colombia.

## Introducción

Este documento presenta en forma resumida los resultados de la investigación obtenidos por el Proyecto Fósforo IFDC/CIAT, relacionados con la evaluación agronómica y económica de fuentes de fósforo (P), las cuales ayudan a identificar áreas y prácticas de fertilización de cultivos.

En la determinación del uso potencial de un fertilizante, nuevo o modificado, en la producción agrícola de un país o región, la investigación agronómica, acompañada por una apropiada evaluación económica juegan un papel muy importante. Los resultados de la investigación presentados se refieren a:

1. La evaluación agronómica de la RF molida, en aplicación directa.
2. La evaluación agronómica de la RPPA con ácido sulfúrico, y
3. La evaluación agronómica de diferentes fuentes de P soluble (SFT) solas o en mezcla con RF.

La RF molida es el fertilizante más elemental que se puede hacer con RF. La RPPA es RF molida tratada con sólo una fracción del ácido sulfúrico (generalmente del 30 al 50%) requerido para convertir completamente el fosfato insoluble a fosfato monocálcico soluble en agua o para hacer superfosfato simple (SFS). La acidulación de la RF también puede hacerse con ácido sulfúrico, hidrociorhídrico, fosfórico o nítrico.

Los resultados presentados han sido obtenidos de reportes anuales y de publicaciones técnicas preparadas como parte de las actividades del Proyecto. Por simplicidad, y en vista de la gran cantidad de datos, se decidió seleccionar experimentos individuales representativos y experimentos combinados para ilustrar los resultados obtenidos y los conceptos discutidos.

Investigaciones conducidas por el Proyecto relacionadas con el uso de la RF como fuente de P, han indicado que los cultivos responden en forma similar a las RF de Huila y Pesca. Las rocas de Iza y de Media Luna, son muy similares a las rocas de Pesca y Huila respectivamente, pero aunque no han sido ensayadas en el campo debido a su falta de disponibilidad en el mercado, se estima que se comportan similarmente. La RF de Sardinata, la cual tiene un contenido de  $P_2O_5$  más alto, pero menos carbonatos reemplazando fosfatos en la estructura del cristal de apatita, es menos reactiva, debido a esto su eficiencia agronómica es inferior a la de otras rocas.

Las recomendaciones aquí hechas para el uso de RF molida para aplicación directa se refieren a la roca fosfórica molida de Huila, Pesca y posiblemente Iza y Media Luna.

Con respecto a la RFFA de las diferentes fuentes, los resultados presentados incluyen investigaciones de campo de productos manufacturados con rocas de Huila y Pesca, las cuales tienen propiedades similares. Las RF de Iza y Sardinata aciduladas para obtener la misma cantidad de P soluble deberían poseer propiedades agronómicas similares. También están incluidos los resultados de la mezclas de RF con DAP y SFT, las cuales simulan los productos parcialmente acidulados. Estas mezclas fueron preparadas para obtener la misma cantidad de P soluble de un producto parcialmente acidulado.

### Evaluación de la RF Molida

Uno de los principales objetivos del Proyecto Fósforo IFDC/CIAT ha sido la identificación de suelos, cultivos, condiciones agroclimáticas y prácticas de manejo, bajo las cuales las RF nativas puedan ser utilizadas efectivamente como fertilizantes. Las investigaciones conducidas por el Proyecto indican que el uso de la RF molida para aplicación directa es recomendable sólo bajo condiciones específicas. Se ha encontrado que los siguientes factores juegan un papel muy importante en la determinación de la efectividad agronómica de la RF:

1. La reactividad química de la roca.
2. El tamaño de la partícula de la roca.
3. Las propiedades del suelo y el clima de la región.
4. El tiempo y el método de aplicación.
5. El cultivo y los sistemas de producción utilizados.
6. El efecto residual de la roca.
7. El uso de la roca como un corrector del suelo.

Los siguientes parágrafos se refieren a los resultados de la investigación obtenidos para cada uno de los factores arriba mencionados.

### **Reactividad Química**

La reactividad de la RF puede ser evaluada por la cantidad del P total que tiene soluble en citrato de amonio neutro, en ácido cítrico (2%), en ácido fórmico (2%), o en citrato de amonio ácido pH = 3. La relación entre la reactividad de

la roca y la respuesta de los cultivos ha sido reportada por León y Hammond, 1984. Estas investigaciones clasifican 11 RF latinoamericanas en cuatro grupos de acuerdo con su efectividad agronómica relativa (EAR).<sup>a</sup> Para esta clasificación Panicum maximum fue el cultivo utilizado en un Oxisol de los Llanos Orientales colombianos. Las 11 RF latinoamericanas fueron clasificadas en comparación con el SFT como: de calificación alta, EAR de 85-100%, de calificación mediana, EAR de 70-84%, de calificación baja, EAR de 40-69%, y de calificación muy baja con EAR menor del 39%.

De acuerdo a esta clasificación las RF colombianas Huila y Pesca son de calificación media y la Sardinata de calificación baja. La roca de Iza no fue incluida en esta clasificación debido a que no estaba disponible, pero de acuerdo a su composición química puede ser clasificada como las rocas de Huila y Pesca.

### **Tamaño de la Partícula**

Experimentos conducidos por el Proyecto Fósforo IFDC/CIAT han mostrado que las RF son más efectivas cuando la superficie de contacto entre las partículas de la roca y el suelo es maximizada para promover la disolución de la roca (León y Hammond, 1984). Resultados experimentales de la investigación confirman que la roca finamente molida (mayor de 100 mesh) o minigranulada (-50 +150 mesh) es más efectiva que la roca en partículas de mayor tamaño (granular).

### **Propiedades del Suelo y Clima de las Regiones**

Las propiedades químicas y físicas de la RF son factores importantes para determinar su efectividad agronómica. Sin embargo, las características buenas de la roca no garantizan una respuesta de los cultivos. A través de investigaciones conducidas por León y Hammond (1984) y por Hughes y Gilks (1986), se ha encontrado que de todas las características del suelo, el pH, la cantidad de P disponible o calcio intercambiable, y la capacidad de fijación de P juegan un papel muy importante en la efectividad agronómica de la RF.

En el caso de las rocas de Huila y Pesca, se ha determinado que se desempeñan mejor en suelos ácidos (pH de 5.5 o menos) con una capacidad de fijación de P de menos del 45% (medida por el método de Fabsbender 1967) y con un contenido de P de menos de 5 ppm Bray I.

---

<sup>a</sup> 
$$EAR = \frac{\text{Rendimiento del producto ensayado} - \text{control}}{\text{Rendimiento del producto estándar} - \text{control}} \times 100$$

Resultados obtenidos en estaciones experimentales y en campos de agricultores con RFH, han mostrado que las rocas pueden ser menos efectivas en los suelos Andepts e Inceptisoles óxicos de Cundinamarca, Boyaca, Cauca y Nariño, que cuando son aplicados a Oxisoles de los Llanos Orientales (Meta), y Ultisoles de Santander de Guilichao (Cauca), los cuales son más ácidos, más bajos en calcio, y exhiben una capacidad de fijación de P más baja. En los Oxisoles y Ultisoles, la RF puede llegar a tener hasta el 90% de la efectividad del SFT, mientras que en los Andepts y en los Inceptisoles su efectividad puede ser tan baja como del 5 al 10%. Un ejemplo representativo de los resultados experimentales obtenidos con papa, arroz, caupi, maíz y frijol utilizando esta roca en estos suelos aparece en el Cuadro 1. Los resultados, (Cuadro 1 y siguientes) son presentados en términos de la efectividad o eficiencia agronómica relativa (EAR), utilizando SFT como referencia. El Cuadro 1 también incluye el rendimiento de las parcelas de control, el cual es útil para medir los aumentos de rendimiento debido al uso de fertilizante, y tener una idea de la fertilidad natural de los suelos en los cuales los experimentos han sido conducidos.

Los resultados experimentales presentados en el Cuadro 1 indican que la efectividad agronómica de las RF Huila y Pesca exhibe grandes fluctuaciones. La RF ha dado resultados consistentemente buenos en los suelos Andepts en Nariño, los cuales tienen un alto contenido de P. Estos suelos han sido fuertemente fertilizados con NPK por muchos años y tienen un alto contenido de P disponible, lo que los hace diferentes de los Andepts de Cundinamarca y Boyacá.<sup>4</sup>

A través de los experimentos conducidos, se ha notado que el clima (temperatura y lluvia) influye en la respuesta de los cultivos a las aplicaciones de RF. En las tierras bajas de los trópicos y las de mediana altitud (0-1000 y 1000-2000 msnm, respectivamente), con temperaturas promedio de más de 24°C y entre 18 y 24°C, los cultivos responden a las aplicaciones de RF, siempre y cuando las condiciones químicas del suelo sean adecuadas para la disolución de la roca. En estas dos regiones donde la efectividad agronómica de la RF fue alta, el clima fue clasificado como subhúmedo (1000 a 2000 mm/año). La alta temperatura del suelo y la adecuada cantidad de humedad favorecen la disolución de la roca.

En el trópico alto y muy alto, 2000 a 3000 msnm y de 3000-4000 msnm respectivamente, con temperaturas anuales que varían de 12° a 18°C y de 6° a 12°C respectivamente donde la papa, el trigo, y la cebada son cultivadas, el promedio anual de lluvia varía entre 500 y 1000 mm/año. Recientes experimentos con papa conducidos por el IFDC y el ICA en

Cuadro 1. Efectividad Agronómica Relativa (EAR) de la RFH y RFP\* en varios cultivos y tipos de suelo.

Fuente de P	Localización	Tipo de Suelo	Cultivo/Dosis (kg P/ha)	Rendimiento (kg/ha)	EAR (%)
SFT	Tausa, Cund.	Andept	Papa	24033	100
RFH			150	2700	7
Control				1066	
SFT	Ipiales, Nariño	Andept	Papa <sup>a</sup>	24628	100
RFH			180	22321	76
Control				15003	
SFT	Ipiales, Nariño	Andept	Maiz/Frijol <sup>b</sup>	7315	100
RFH			60	7135	92
Control				4863	
SFT	C/magua, Meta	Oxisol	Arroz seco	4819	100
RFH			40	4795	99
Control				1172	
SFT	V/cencio, Meta	Oxisol	Arroz riego	5510	100
RFH			25	4929	51
RFP				4996	57
Control				4314	
SFT	C/magua, Meta	Oxisol	<u>B. decumbens</u>	32400	100
RFH			44	31750	96
RFP				35950	120
Control				14400	
SFT	B/chao, Cauca	Ultisol	Maiz	4491	100
RFH			87	3370	40
Control				2617	
SFT	Pescador, Cauca	Inceptisol	Maiz	872	100
RFH			50	111	13
Control				0	
SFT	Pescador, Cauca	Inceptisol	Frijol	1089	100
RFH			140	308	27
Control				45	
SFT	Caldono, Cauca	Inceptisol	Yuca <sup>c</sup>	23232	100
RFH			82	12631	54
Control				10300	

\*RFH = RF Huila; RFP = RF Pesca.

a. Promedio de 5 experimentos.

b. Promedio de 9 experimentos. Rendimiento expresado en equivalentes de maiz.

c. Promedio de 3 experimentos.

estas dos regiones indican que una mejor respuesta fue obtenida en la región alta que en la región muy alta. Aparentemente la temperatura muy fría del suelo no favorece la disolución de la roca.

### **Tiempo y Método de Aplicación**

Investigaciones conducidas en granjas experimentales y en campos de agricultores han demostrado que rendimientos altos se obtienen aplicando SFT en el sitio al momento de la siembra. Cuando la RF es utilizada como fuente de P, rendimientos más altos se logran aplicando la roca al voleo, incorporada, y preferiblemente 30 días antes de la siembra. El Cuadro 2 presenta los resultados de 3 experimentos (frijol, papa y maíz) que compara métodos y momentos de aplicación que ilustran las afirmaciones anteriores.

La aplicación de la RF al voleo e incorporada 30 días antes de la siembra no es muy práctica en tierras muy empinadas y sujetas a erosión. En estas áreas, donde la labranza mínima es ampliamente utilizada, la RF puede ser aplicada a un volumen reducido de suelo. También, la aplicación de fertilizante 30 días antes de la siembra promueve el desarrollo de malezas. Estas dos limitaciones en la utilización de RF deben ser cuidadosamente evaluadas antes de efectuar recomendaciones específicas para estas áreas.

### **Cultivo y Sistema de Producción Utilizado**

Resultados de la investigación indican que aún bajo condiciones apropiadas de suelo, la RF es más efectiva cuando es utilizada en cultivos tales como pastos, leguminosas forrajeras, caupi, maní, y arroz, que cuando es utilizada en cultivos tales como maíz, frijol y papa. Las razones para esto están relacionadas en parte, con las condiciones climáticas (temperatura, lluvia), con la duración del ciclo de vida y con la habilidad de las plantas para asimilar el P del suelo.

El Cuadro 1 presenta los resultados de la investigación de experimentos conducidos con arroz, caupi, yuca, pastos, maíz y papa, en diferentes regiones agroclimáticas de Colombia. Como este cuadro lo muestra, la efectividad agronómica relativa de la RF varía desde 120% para pastos en Carimagua hasta 13% para maíz en Pescador, Cauca y 7% para papa en Tausa, Cundinamarca.

### **Efecto Residual**

Otro factor que debe ser considerado en la evaluación agronómica de cualquier fuente de P es su efecto residual. Investigaciones conducidas por el Proyecto utilizando

Cuadro 2. Efecto del método y tiempo de aplicación de RFH y SFT.

Fuente de P	Localización	Método de Aplicación	Cultivo/Dosis (kg P/ha)	Rendimiento (kg/ha)	EAR (%)
SFT	Tausa, Cund.	En Sitio	Papa	24033	100
RFH		Al Voleo	150	2700	7
RFH		En Sitio		2600	7
Control				1066	
SFT	Pescador, Cauca	En Sitio	Frijol	1203	100
SFT		Al Voleo	100	1141	95
RFH		En Sitio		384	28
RFH		Al Voleo		508	39
Control				68	
SFT	Pescador, Cauca	En Sitio	Maíz	872	100
SFT		Al Voleo	50	710	81
RFH		En Sitio		87	10
RFH		Al Voleo		111	13
Control				0	
SFT	Pescador, Cauca	A La Siembra	Frijol	1101	100
SFT		30 días AS	100	856	78
RFH		A La Siembra		487	44
RFH		30 días BP		502	46
Control				0	
SFT	T/rres, Nariño	En Sitio	Papa	46013	100
RFH		Al Voleo	150	41951	56
RFH		En Sitio		41193	47
Control				36837	

Brachiaria decumbens han indicado que las RF de reactividad media, como la del Huila, aumentan su eficiencia agronómica a través del tiempo y su efecto residual es igual al del SFT para el tercer cultivo. En el caso de rocas con reactividad un poco más baja, como la de Pesca, su eficiencia agronómica aumenta durante los primeros tres cultivos y se ha notado que llegan a alcanzar el 82% de la reactividad agronómica del SFT al tercer año.

Experimentos conducidos para medir el efecto residual del SFT y de la RFH, en rotaciones de cultivos como frijol/maíz/trigo y papa/trigo/trigo han indicado que no hay diferencias en el efecto residual de estas fuentes (IFDC/CIAT, 1986). Los resultados de la investigación indican claramente que en lugares donde la efectividad agronómica de la RF es igual a la del SFT, esta efectividad permanece constante a través del tiempo. En otras palabras, a medida que disminuyen los rendimientos de los cultivos obtenidos con el SFT en los cultivos subsecuentes, lo mismo sucede a los rendimientos obtenidos con las RF. También en suelos donde la RF no es tan efectiva como el SFT durante el primer cultivo, el efecto residual de la RF permanece como una fracción del efecto residual del SFT a través del tiempo (León y Hammond, 1984).

#### **Uso de la RF como Corrector**

La RF es utilizada actualmente por agricultores como corrector en suelos ácidos y de baja disponibilidad de P. Para medir la efectividad de la RF, como corrector de suelo, el Proyecto condujo experimentos para comparar la RFH (1.0 t/ha), cal dolomítica (1.0 t/ha), y una mezcla de cal dolomítica y RF (500 kg/ha de cada una), en frijol en el área de Pescador, Cauca.

Los resultados de estos experimentos aparecen en el Cuadro 3. Estos resultados indican que la RFH utilizada sola o mezclada con la cal dolomítica produce rendimientos en frijol más altos que la cal dolomítica sola. Estos resultados fueron consistentes para las dos estaciones en las cuales los experimentos fueron llevados a cabo. En uno de los experimentos la mezcla de RF y cal produjo los rendimientos más altos, mientras que en los otros dos los produjo la RFH sola.

#### **Evaluación Agronómica la RFFA**

En algunos suelos la baja respuesta de algunos cultivos a la RF puede ser atribuida a su baja solubilidad, lo cual hace que el P no sea disponible para que lo asimilen los cultivos. Una forma común de aumentar la solubilidad de la RF es acidularla totalmente para producir SFS o SFT, o

acidularla parcialmente para producir RFFA. Aumentando la solubilidad de la roca, su eficiencia agronómica aumenta, lo cual resulta en rendimientos más altos de los cultivos. Los resultados presentados aquí corresponden a RF acidulada al 50% con ácido sulfúrico. Resultados obtenidos con los experimentos del Proyecto indican que las mezclas físicas de RF con SFT o DAP, simulando productos parcialmente acidulados, dan los mismos resultados que los productos parcialmente acidulados. Debido a esto, los resultados aquí presentados también son aplicables para estas mezclas.

Cuadro 3. Efectividad Agronómica Relativa de la RFH utilizada como corrector de suelo en frijol (Pescador, Cauca).

Corrector	Primer Cultivo		Segundo Cultivo	
	Rendimiento (kg/ha)	EAR (%)	Rendimiento (kg/ha)	EAR (%)
RFH	344	100	230	100
Cal Dolomítica	101	27	157	68
Cal+RFH	314	91	184	80
Control	10	-	0	-
RFH	311	100	341	100
Cal Dolomítica	85	3	99	-
Cal+RFH	205	55	300	78
Control	78	-	151	-
RFH	585	100	808	100
Cal Dolomítica	561	94	774	95
Cal+RFH	707	129	915	115
Control	159	-	109	-

A través de la investigación conducida en el Proyecto, se ha encontrado que las mejores prácticas de manejo para el uso

de RFFPA son iguales a las del manejo del SFT. Esto quiere decir que el mejor tiempo y método de aplicación para el SFT son también los mejores para las RFFPA.

El Cuadro 4 presenta resultados experimentales y la EAR obtenidos con rocas parcialmente aciduladas. Estos resultados muestran que la RFFPA puede ser, en algunos casos, tan efectiva como el SFT, pero que su efectividad agronómica relativa a menudo varía entre el 85 y el 95%. Esto es cierto para una gran variedad de suelos, condiciones agroclimáticas y cultivos. En los Oxisoles ácidos de baja fertilidad y en los Ultisoles de los Llanos Orientales, las RFFPA utilizadas en pastos, arroz y sorgo fueron tan buenas como el SFT. En los suelos Andepts de Nariño, la RFFPA puede dar rendimientos de papa y de maíz/frijol más altos que los del SFT. Por otro lado, en Cundinamarca y Boyacá en las áreas de papa, los rendimientos obtenidos con la RFFPA pueden llegar a ser un 85% de aquellos obtenidos con el SFT.

#### Evaluación Económica de Fuentes de P

La evaluación económica se refiere a la estimación de los beneficios netos recibidos por el agricultor debido al uso de fertilizante. Dichos beneficios están definidos como la diferencia entre el aumento en la producción menos el costo del fertilizante utilizado. Para estimar el valor del aumento de la producción, son utilizados los precios de los cultivos recibidos por los agricultores, mientras que para estimar del costo del fertilizante, son utilizados los precios pagados por ellos. Los precios utilizados fueron: para SFT y RFFPA \$200/kg de P, para RFH y RFP \$125/kg de P, arroz \$42/kg, yuca \$35/kg, maíz \$32/kg, papa \$20/kg, y frijol \$120/kg. Debido a que la RFFPA es un producto no disponible en el mercado, su evaluación fue realizada asumiendo que el precio es igual al del SFT, por lo que su eficiencia económica está directamente relacionada con su efectividad agronómica relativa, tal como aparece en el Cuadro 5. Si en el futuro la RFFPA estuviera disponible para los agricultores a precios más altos o más bajos que los utilizados en esta evaluación, su eficiencia económica relativa será también más alta o más baja.

Debido a que el retorno neto debido al uso de fertilizantes cambia a medida que cambian los precios de los fertilizantes y de los cultivos, fue calculada la relación valor/costo, que mide la relación entre el aumento en valor de la producción y el costo total del fertilizante. La relación valor/costo está menos sujeta a variaciones debidas a cambios en los precios, y no cambia en situaciones donde los precios de los cultivos y de los fertilizantes cambian al mismo ritmo. La relación valor/costo nos da una indicación de que tan seguro es invertir recursos en fertilizantes.

Cuadro 4. Efectividad Agronómica Relativa de la RFHFA y de la RFPPA\* comparadas con el SFT en diferentes suelos y cultivos.

Fuente de P	Localización	Tipo de Suelo	Cultivo/Dosis (kg P/ha)	Rendimiento (kg/ha)	EAR (%)
SFT	M/vita, Boyacá	Andept	Papa	24300	100
RFHFA			150	20640	80
Control				5610	
SFT	Ipiales, Mariño	Andept	Papa <sup>a</sup>	24628	100
RFHFA			150	25914	113
Control				15003	
SFT	Ipiales, Mariño	Andept	Maíz/Frijol <sup>b</sup>	7315	100
RFHFA			60	7435	105
Control				4863	
SFT	Pescador, Cauca	Inceptisol	Frijol	1248	100
RFHFA			100	1151	88
Control				454	
SFT	Pescador, Cauca	Inceptisol	Maíz	1580	100
RFHFA			150	1448	92
Control				0	
SFT	V/cencia, Meta	Oxisol	Arroz riego	4793	100
RFHFA			25	4743	92
Control				4178	
SFT	El Caibe, Meta	Oxisol	Sorgo	2331	100
RFHFA			100	2336	105
RFPPA				2340	109
Control				2228	
SFT	Caldono, Cauca	Inceptisol	Yuca <sup>c</sup>	23232	100
RFHFA			82	20876	82
Control				10300	

\*RFHFA = RF Huila parcialmente acidulada; RFPPA = RF Fesca parcialmente acidulada.

a. Promedio de 5 experimentos.

b. Promedio de 9 experimentos. Rendimiento expresado en maíz equivalentes.

c. Promedio de 3 experimentos.

Cuadro 5. Evaluación económica de diferentes fuentes de fósforo mediante la Relación Valor/Costo (RVC) y la Efectividad Económica Relativa (EER).

Fuente de P	Localización	Tipo de Suelo	Cultivo	Dosis (kg P/ha)	Rendimiento (kg/ha)	RVC	EER (%)
SFT	Tausa, C/marca	Andept	Papa	150	24033	15.3	100
RFH				0	-	-	0
Control					1066		
SFT	Ipiales, Nariño	Andept	Papa <sup>a</sup>	180	24628	5.3	100
RFHPA				180	25914	6.1	116
RFH				180	22321	6.5	79
Control					15003		
SFT	Motavita, Boyacá	Andept	Papa	150	24300	12.5	100
RFHPA				150	20640	10.0	79
Control					5610		
SFT	Pescador, Cauca	Inceptisol	Frijol <sup>a</sup>	104	841	4.4	100
RFHPA				92	738	4.4	86
RFH				39	142	2.3	5
Control					71		
SFT	Pescador, Cauca	Inceptisol	Maiz	150	1965	2.1	100
RFHPA				100	1428	2.3	78
RFH				0	-	-	0
Control					0		
SFT	Caldono, Cauca	Inceptisol	Yuca	82	23232	27.6	100
RFHPA				82	20876	22.6	81
RFH				82	12631	8.0	16
Control					10300		
SFT	V/cencio, Meta	Oxisol	Arroz riego <sup>b</sup>	29	4819	4.6	100
RFHPA				39	4819	3.5	91
RFH				32	4658	5.0	77
RFP				24	4650	6.6	80
Control					4178		
SFT	C/magua, Meta	Oxisol	Arroz seco <sup>a</sup>	40	4436	16.1	100
RFH				40	4456	26.6	101
Control					1172		

a. Promedio de 5 experimentos.

b. Promedio de 4 experimentos.

Para inducir a los agricultores a invertir en fertilizantes la relación valor/costo debe ser por lo menos dos; una relación valor/costo menor que dos indica que el uso de fertilizantes es de mucho riesgo para ser aceptable. La efectividad económica relativa (EER) mide la efectividad económica de la RFFA y de la RF en relación con la del SFT y se define como la relación del ingreso neto obtenido con la RFFA y con la RF y los retornos netos obtenidos con el SFT. Para la evaluación económica presentada aquí, la estimación de estos parámetros económicos fue efectuada a la dosis de aplicación la cual maximiza los retornos netos para cada producto ensayado.

La RF usada para aplicación directa tiene la EER más baja de todos los productos ensayados. La eficiencia económica relativa de la RF fue más alta en los suelos de los Llanos Orientales (Oxisoles) y en el área de Nariño (Andepts). La eficiencia económica relativa más baja de la RF se obtuvo en los suelos de Cundinamarca y Boyacá (Andepts) y en los suelos de Pescador, Cauca (Andepts). En algunos de estos suelos no hubo la suficiente respuesta de los cultivos como para justificar la aplicación de RF.

Los resultados aquí presentados indican que la RFFA y la RF molida producen una mayor eficiencia económica relativa en los mismos tipos de suelos (Oxisoles) de los Llanos Orientales y los Andepts de Nariño. En los lugares donde las aplicaciones de la RFFA no fue muy efectiva, las de RF fueron menos efectivas.

El Cuadro 6 presenta los resultados de la evaluación económica de la RF Huila utilizada como corrector de suelo en tres experimentos conducidos durante dos cultivos consecutivos. La efectividad de la RF como corrector de suelo está determinada por la cantidad de carbonatos de calcio libre que ella tiene; debido a esto, los resultados discutidos aquí se aplican solamente a la roca de Huila, la cual tiene el mayor porcentaje de carbonatos de calcio de todas las rocas colombianas.

El Cuadro 6 indica que en los tres experimentos realizados, la RFH utilizada sola o mezclada con cal dolomítica, produjo aumentos de rendimiento y una efectividad económica relativa mayores que la cal dolomítica utilizada sola. De acuerdo a la relación valor/costo obtenida con estos experimentos se puede asegurar que, comparada con la cal dolomítica, el uso de RFH como corrector de suelo es una buena opción para los agricultores. Obviamente, los mayores aumentos de rendimiento obtenidos con la RFH fueron debidos en parte al contenido de P en la roca y en parte a su efecto encalador. Sin embargo, estos resultados son preliminares y es necesaria más investigación en esta área para identificar

mejor los suelos donde la roca puede ser usada efectivamente como un corrector, la mezcla apropiada de RFH y cal, y para determinar los aumentos de rendimiento debido al contenido de fósforo y al efecto del calcio de la roca.

Cuadro 6. Análisis económico mediante la Relación Valor/Costo (RVC) y la Efectividad Económica Relativa (EER) de la RFH utilizada como corrector de suelo en el cultivo de frijol en Pescador, Cauca.

	Rendimiento (kg/ha)		RVC <sup>a</sup>	EER (%)
	Primer cultivo	Segundo cultivo		
RFH	344	230	4.1	100
Cal Dolomítica	101	157	2.1	41
Cal+RFH	314	184	5.3	91
Control	10	0		
RFH	311	341	2.8	100
Cal Dolomítica	85	99	-	-
Cal+RFH	205	300	2.4	61
Control	78	151		
RFH	585	808	8.6	100
Cal Dolomítica	561	774	20.9	101
Cal+RFH	707	915	15.5	127
Control	159	109		

a. Los precios utilizados fueron: RFH \$12,000/ton, Cal Dolomítica \$5,000/ton, y frijol \$120/kg.

El segundo cultivo fue descontado a  $i = 30\%$ .

### Uso Potencial de las RF

Esta sección presenta una descripción resumida de los suelos de Colombia, su contenido de P y la estimación del uso potencial de RF y de RFPA en diferentes regiones y cultivos

del país. Incluye estimativos de la efectividad agronómica relativa de su uso en diferentes cultivos y en zonas agroecológicamente homogéneas, e identifica algunos cultivos alimenticios importantes en los cuales estos productos pueden ser utilizados. También se incluyen algunos mapas que muestran la localización aproximada de las regiones donde la RF y la RPPA pudieran ser utilizadas efectivamente.

### Suelos

Colombia es un país con un área total estimada de 114.175.000 hectáreas. Como se puede apreciar en el Cuadro 7 sólo 10.9 millones de hectáreas son aptas para la producción de cultivos anuales sin riego, y 3.5 millones de hectáreas pueden ser cultivadas con la ayuda de riego. El área agrícola del país (irrigada y que no necesita riego) llega a un total de 14.4 millones de hectáreas, o sea solamente el 12.7% del área total del país. Del área restante, 19.2 millones de hectárea, ó 16.8% del total, son aptas para producción extensiva y semi-intensiva de productos agropecuarios, mientras que 67.1 millones de hectáreas o sea el 58.7% del total están consideradas sin posibilidades de producción agrícola.

Los suelos de Colombia han sido clasificados de acuerdo con el sistema de clasificación de los Estados Unidos (Cortéz, et al., 1982). El país presenta una gran variedad de suelos pero como aparece en el Cuadro B está dominado por los Inceptisoles, Entisoles, Oxisoles y Ultisoles. Se estima que el 91.6% de los suelos en el país pertenecen a alguno de estos ordenes de suelos. De estos cuatro ordenes, los Inceptisoles y los Entisoles son los predominantes en las áreas actualmente cultivadas del país. Los Oxisoles y Ultisoles son más comunes en la región de los Llanos Orientales, una área que está ganando importancia debido a que ofrece el mejor y más grande potencial para expansión de la producción agrícola comercial. El área de los Llanos Orientales está relativamente cerca a importantes áreas de mercado, bajo condiciones climáticas las cuales favorecen la agricultura y formada mayormente por áreas planas fácilmente mecanizables.

### Fertilidad

La fertilidad natural de los suelos colombianos varía grandemente de una región a otra. En general, el contenido de P disponible en los suelos colombianos se considera como bajo, y el uso de fertilizantes fosfatados en la producción agrícola comercial es recomendado. Excepciones a esto son áreas de alta fertilidad tales como la Sabana de Bogotá, ciertas áreas en la Costa Atlántica, el Valle del Río Cauca y el Valle del Río Zulia.

Cuadro 7. Clasificación de Tierras en Colombia (Cortéz, 1985).

Tipo de Tierras	Area	
	10 <sup>3</sup> ha	%
<u>Areas Agrícolas</u>		
Agricultura de Riego	3,499	3.1
Agricultura de Secano		
Tierras Planas--Cultivos Transitorios	2,693	2.4
Tierras de Ladera--Cultivos Transitorios	190	.2
Cultivos Permanentes	7,981	7.0
Sub-Total	14,363	12.7
<u>Areas Ganaderas</u>		
Producción Ganadera Extensiva y Semi-Intensiva. Cultivos Transitorios y Semi-Permanentes	8,343	7.3
Ganadería Extensiva	4,942	4.3
Ganadería muy Extensiva	5,966	5.2
Sub-Total	19,251	16.8
<u>Areas Forestales</u>		
Con Posibilidad Agrícola	11,208	9.8
Sin Posibilidad Agrícola	67,093	58.7
Sub-Total	78,301	68.5
<u>Otras Areas</u>		
Ciénagas, Pantanos, Ríos y Zonas Urbanas	2,259	2.0
Total	114,175	100.0

Cuadro 8. Distribución de los suelos en Colombia. (Estimado de: "Mapa de Suelos de Colombia", 1982. Instituto Geográfico Agustín Codazzi).

Orden	Área	
	10 <sup>6</sup> ha	%
Entisoles	23.5	21.0
Inceptisoles	15.9	14.2
Entisoles/Inceptisoles	18.6	16.6
Oxisoles	12.8	10.7
Oxisoles/inceptisoles	18.6	16.6
Oxisoles/Ultisoles	6.2	5.5
Oxisoles/Entisoles	5.5	4.9
Ultisoles/Inceptisoles	3.5	3.1
Total	104.6	91.6
Área Total del País	114.2	100.0

El Cuadro 9 presenta un resumen de los resultados de aproximadamente 100,000 muestras de suelo analizadas por el ICA entre 1965 y 1978 (Marín, et al., 1982). Este cuadro presenta la distribución porcentual de las muestras de suelo por región natural y niveles de disponibilidad de P. Como se puede ver, en seis de las 10 regiones enumeradas más del 50% de las muestras de suelo fueron consideradas como bajas en P. La Costa Atlántica y la Guajira fueron las únicas dos regiones donde más del 50% de las muestras fueron clasificadas con una alta disponibilidad de P.

El Cuadro 10 presenta la distribución porcentual de muestras de suelo para cultivos importantes y por departamento de acuerdo a los requerimientos específicos de los cultivos y a la disponibilidad de P en el suelo. Este cuadro también incluye un estimado (preliminar) del área sembrada con estos cultivos durante 1986. Como este cuadro lo muestra, para muchos de estos cultivos y en varios departamentos los

suelos bajos en P son dominantes (más del 50%) y en algunos casos, los suelos con bajo P llegan a ser más del 70% de las muestras. Parece ser que la mayoría de los suelos donde la papa, la yuca, el frijol y el maíz son cultivados tienen una baja disponibilidad de P. Debido a esto, para una producción agrícola comercial sostenida de estos cultivos en estas áreas, el uso de fertilizantes fosfatados es indispensable.

Cuadro 9. Distribución de muestras de suelo por región natural y niveles de disponibilidad de fósforo (Marín et al., 1982).

Región Natural	Disponibilidad de fósforo		
	Baja (%)	Media (%)	Alta (%)
Región Andina	68	14	18
Sabana de Bogotá	45	25	30
Valle de Magdalena (alto)	46	17	37
Valle de Magdalena (bajo)	59	16	25
Valle de Cauca	52	21	27
La Costa Pacífica	80	11	9
La Costa Atlántica	27	13	60
Guajira	25	15	60
Orinoquia	69	15	16
Amazonia	77	11	12

### Uso potencial

El Cuadro 11 presenta la eficiencia agronómica relativa estimada para la RF y para la RFFA para diferentes cultivos y en las regiones agroecológicas homogéneas de Colombia. Este cuadro incluye todas aquellas áreas con potencial agrícola para cultivos alimenticios, industriales y pastos, en seco o bajo riego. Las zonas agroecológicas homogéneas fueron determinadas considerando los siguientes factores:

1. Clima: altitud, temperatura y lluvia.

Cuadro 10. Distribución de muestras de suelo por cultivo, departamento y nivel de disponibilidad de fósforo. (Marín et al., 1982).

Cultivo	Departamento	Área cultivada* (10 <sup>3</sup> ha)	Disponibilidad de P		
			Baja (%)	Medja (%)	Alta (%)
Arroz	Meta	67.5	65	22	13
	Tolima	75.3	38	26	36
	Huila	31.8	36	15	49
Maíz	Antioquia	105.2	70	16	44
	Cundinamarca	70.8	59	14	27
	Boyacá	42.0	44	18	38
	Nariño	39.9	66	17	17
Frijol	Antioquia	31.1	83	13	4
	Boyacá	42.0	47	16	37
	Cauca	2.2	81	9	10
	Valle del Cauca	5.2	55	23	22
	Huila	30.0	56	29	15
Papa	Boyacá	39.0	74	7	19
	Cundinamarca	53.0	66	10	24
	Nariño	18.0	59	19	22
	Antioquia	15.8	84	11	5
Yuca	Cauca	2.8	96	3	1
	Meta	4.5	83	7	10
	N de Santander	7.6	55	18	27
	Valle del Cauca	3.0	70	14	16
Caña de azúcar (panela)	Boyacá	18.1	74	15	11
	Cundinamarca	40.5	43	26	31
	Antioquia	37.7	84	9	7
	Nariño	20.0	70	12	18
	Santander	25.4	56	24	20
Pastos	Antioquia		77	14	9
	Boyacá		61	15	24
	Cundinamarca		49	25	26
	Meta		75	8	17
	Valle del Cauca		69	16	15

a. Estimativo preliminar 1986.

Cuadro 11. Eficiencia Agronómica Relativa estimada para la RF y la RFPA para diferentes cultivos en regiones agro-ecológicas homogéneas de Colombia.

Región	Área (ha)	Cultivo	EAR (%)	
			RF	RFPA
<u>0-1000 mm, Temperatura &gt;24°C, Lluvia 500 a 2000 mm/año</u>				
Eg	114,500	Pastos	95	100
Cj	3,171,925	Arroz	55	85
		Maíz/Sorgo	25	85
Co	3,139,350	Pastos	95	100
		Yuca	85	95
		Maní	85	95
		Sorgo	55	90
Cq	453,875	Arroz	85	95
Cr	681,600	Pastos	95	100
Cs	5,038,400	Pastos	85	95
<u>0-1000 mm, Temperatura &gt;24°C, Lluvia 2000 a 8000 mm/año</u>				
Kd	1,433,750	Arroz	65	90
		Yuca	65	85
		Maíz/Sorgo	45	85
Ke	238,500	Pastos	85	100
		Yuca	85	95
		Maíz	45	85
Kf	1,089,500	Pastos	85	95
		Arroz	85	95
		Maíz	55	85
Kk	915,175	Pastos	85	100
Kr	1,742,625	Maíz	45	85

(Continúa)

Cuadro 11. Eficiencia Agronómica Relativa Estimada para la RF y la RFPa para diferentes cultivos en regiones agro-ecológicas homogéneas de Colombia. (Continuación).

Región	Área (ha)	Cultivo	EAR (Z)	
			RF	RFPa
<u>1000-2000 mm, Temperatura 18°-24°C, Lluvia 500 a 1000 mm/año</u>				
Ma <sup>a</sup>	76,325			
<u>1000-2000 mm, Temperatura 18°-24°C, Lluvia 1000 a 4000 mm/año</u>				
Me	409,150	Frijol	25	85
		Yuca	65	90
		Caña de Azúcar	65	90
Mf	1,129,175	Caña de Azúcar	65	90
		Pastos	75	95
<u>2000-3000 mm, Temperatura 12°-18°C, Lluvia 500 a 1000 mm/año</u>				
Fa	221,750	Papa	20	85
		Trigo	20	85
		Maíz/Frijol	80	100
Fc	132,150	Pastos	65	90
Fg	38,625	Pastos	75	95
		Papa	20	95
Fh	188,750	Papa	15	90
		Frijol	5	90
		Maíz	5	90
Fk	699,125	Pastos	55	90
<u>3000-4000 mm, Temperatura 6°-18°C, Lluvia 500 a 2000 mm/año</u>				
Pa	45,500	Papa	75	95
<u>Área Total</u>	20,959,750			

a. Esta región incluye suelos con alta fertilidad donde la fertilización con RF o con RFPa no es recomendable.

2. Geomorfología: pendiente y relieve.
3. Material parental: sedimentario, ígneo, metamórfico, y
4. Suelos: grado de evolución, profundidad efectiva, drenaje, erosión y fertilidad.

Las regiones homogéneas son identificadas con códigos de letras, descripciones de las cuales pueden ser encontradas en la publicación original (Cortéz, 1985).

La efectividad agronómica relativa para la RF y para la RFFA ha sido estimada para cultivos de la región, o para aquellos cultivos recomendados en esas regiones. Este estudio no consideró cultivos industriales tales como café, tabaco, caña de azúcar y algodón.

Como se puede ver de las estimaciones de efectividad agronómica relativa presentados en el Cuadro 11, una gran variación puede ser esperada del comportamiento de la RF y de la RFFA en diferentes cultivos y regiones agroecológicas. Por ejemplo en las regiones Cg, Co y Cr para pastos, la efectividad agronómica relativa de RF se estima en 95%, mientras que en regiones tales como la Fa con papa y Fh con maíz y frijol se estima que la efectividad agronómica relativa de la RF no exceda al 20%. Obviamente, en regiones con una alta efectividad agronómica relativa para RF es ventajoso utilizarla, mientras que en regiones donde ésta es baja no es recomendable.

Con respecto al comportamiento de la RFFA, puede notarse que su efectividad agronómica relativa es más alta que la de la RF, y que para algunos cultivos y en algunas regiones agroecológicas puede ser igual al 100%. A pesar de que resultados experimentales obtenidos por el Proyecto indican que la RFFA, en ciertos casos puede tener una efectividad agronómica relativa mayor que el 100%, para áreas extensas tales como las presentadas en el Cuadro 11, es improbable que la RFFA se comporte mejor que el SFT u otra fuente soluble de P. La efectividad agronómica relativa de la RFFA se estima que sea entre 85 y 100% en las zonas agroecológicas homogéneas seleccionadas de Colombia, lo que indica que su uso a través del país es adecuada.

La Figura 1 muestra las áreas generales aproximadas del país donde la RF puede ser aplicada a pastos con una efectividad agronómica relativa del 85 al 100%, y del 85 al 90% en arroz. La Figura 2 presenta información similar para la RFFA, con eficiencias agronómicas relativas estimadas de; en pastos, 95-100%, en arroz, 90-95%, en sorgo y maíz, 85-90%, en papa, 85-100%, en frijol, 85-95% y caña de azúcar para panela, 90-95%.

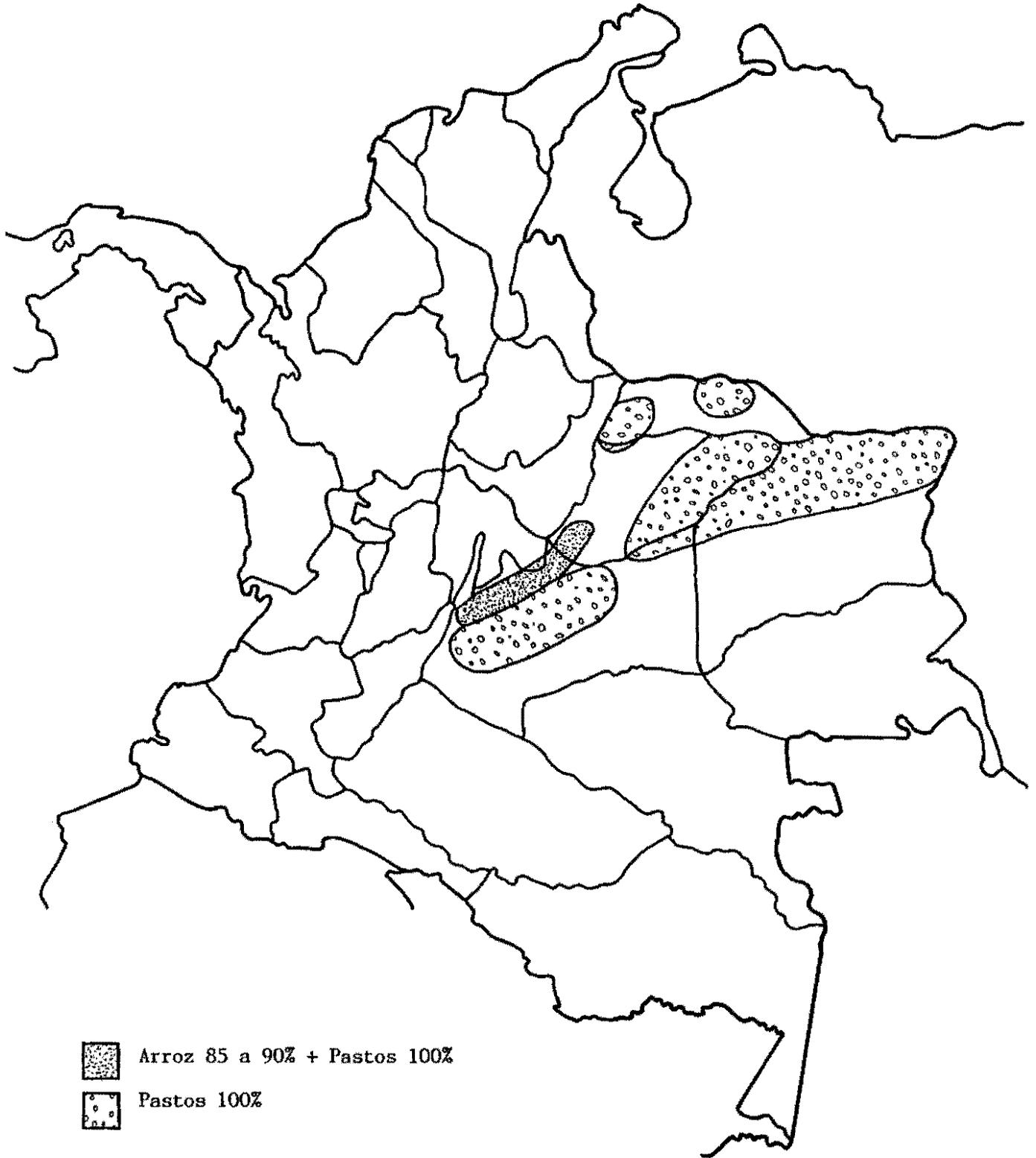


Figura 1. Areas potenciales, cultivos y EAR para roca fosf6rica.

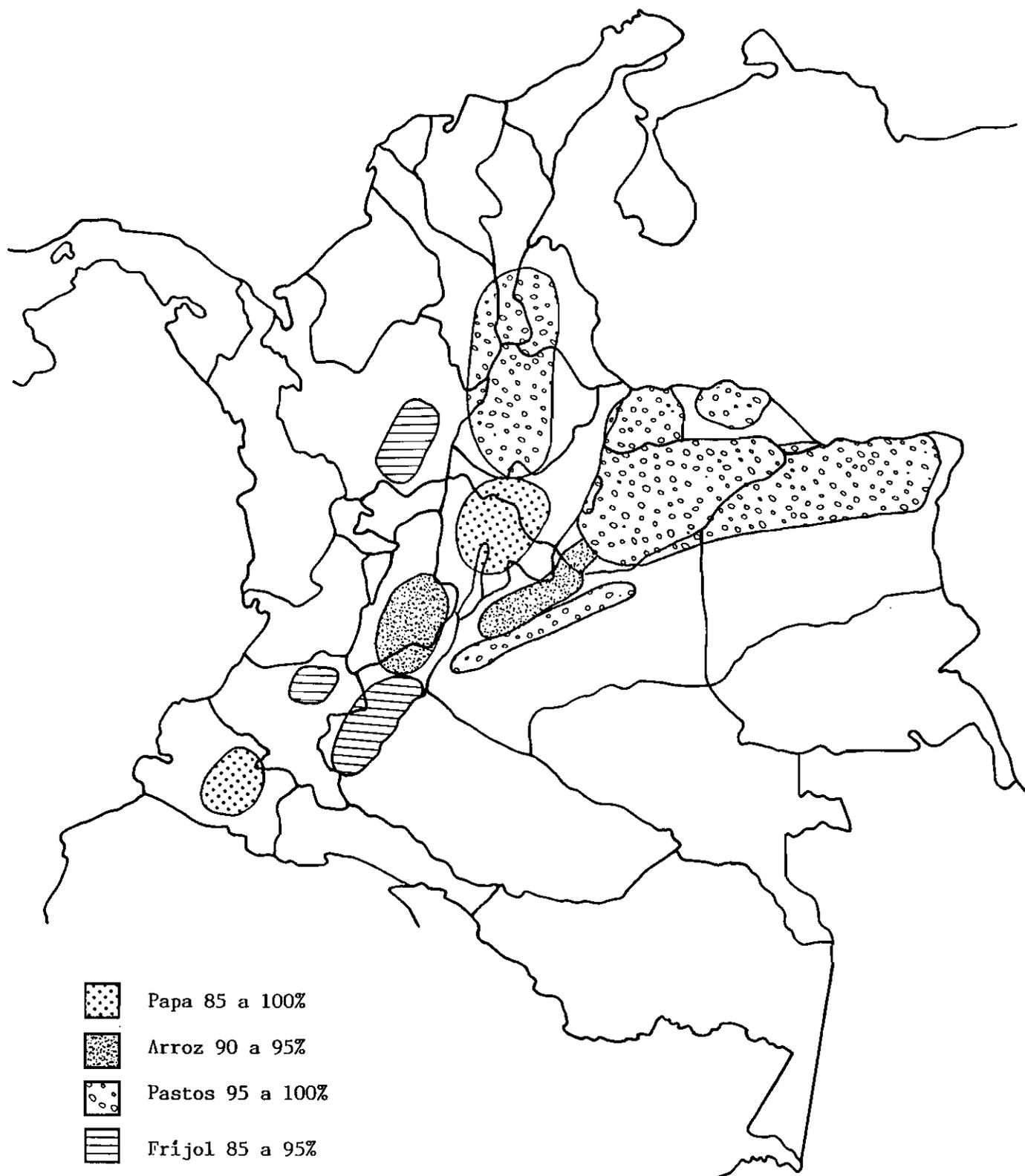


Figura 2. Areas potenciales, cultivos y EAR para RFPA.

De este análisis se puede concluir que la RFFA puede ser utilizada efectivamente como fuente de P en el país en una gran variedad de cultivos y en las principales regiones agrícolas. Por otro lado, la RF puede ser utilizada como fuente de P sólo en ciertas áreas del país, y en algunos cultivos donde su efectividad ha sido comprobada. La RF puede también ser utilizada como corrector de suelo en grandes áreas del país que presentan suelos ácidos y de baja fertilidad.

Para determinar el potencial (uso posible o recomendado) de la RF doméstica para suministrar las necesidades de fósforo en los cultivos en el país, se puede afirmar que a través de la utilización de RF molida para aplicación directa y de RFFA, la mayoría de las necesidades de P del país pueden ser abastecidas. Sin embargo, como estos dos productos tienen en general una EAR y una EER más bajas que el SFT, sus precios deberían ser también más bajos que el del SFT, para inducir a los agricultores a que los utilicen.

El Cuadro 12 presenta una estimación del potencial de P utilizado por diferentes cultivos en diferentes áreas del país. El uso potencial de P fue estimado multiplicando las dosis recomendadas por cultivo y por región y el contenido de P del suelo por las áreas con cada cultivo. Las áreas con contenido de P bajo y medio fueron estimadas utilizando los porcentajes presentados en el Cuadro 9. Los cultivos y áreas incluidos en este cuadro utilizaron el 55% del P en el país durante 1985.

Como el Cuadro 12 muestra, se estima que el uso potencial de fósforo en estos cultivos es de 30,721 toneladas de P, (70,351 toneladas de  $P_2O_5$ ) utilizando datos de áreas de 1986. Se estima que la mayor parte de estas necesidades de P pueden ser suministradas por la RFFA producida con reservas domésticas. También la RF para aplicación directa puede ser utilizada para proveer las necesidades de fosfatos en los suelos del Meta (arroz, maíz y yuca), Nariño (papa), y en todos los suelos con bajo contenido de P que son cultivados con caña de azúcar para panela. Sin incluir pastos y otros cultivos donde se estima que la RF puede ser utilizada (por ejemplo palma africana, y sorgo), la RF puede ser utilizada para suministrar 8,420 toneladas de P (19,281 toneladas de  $P_2O_5$ ). Esto es equivalente aproximadamente a 87,600 toneladas de RF con un contenido promedio de  $P_2O_5$  del 22%.

Adicionalmente, como se ha mostrado en este reporte, la RF puede ser utilizada efectivamente como corrector en suelos ácidos, donde la respuesta agronómica y los beneficios económicos obtenidos del uso de la RF y de la RF mezclada con cal dolomítica, exceden aquellos obtenidos por el uso de la cal dolomítica sola. Hay varios millones de hectáreas en el país con suelos ácidos donde la RF puede ser utilizada efectivamente como un encalador de suelo.

Cuadro 12. Uso potencial de fósforo en varios cultivos.

Potencial de cultivo	Departamento	Recomendación (kg P/ha)		Area (10 <sup>3</sup> ha)		P
		Baja	Media	Baja	Medio	
Arroz	Meta	33	22	43.9*	14.9	1777
	Tolima	18	9	28.6	19.6	691
	Huila	18	9	11.4	4.8	248
Maíz	Antioquia	44	22	73.6	16.8	3608
	Cundinamarca	22	11	41.8	9.9	1029
	Boyacá	22	11	18.5	7.6	491
	Nariño	44	22	26.3	6.8	1307
	Meta	33	22	7.6*	2.1	297
Frijol	Antioquia	33	22	25.8	4.0	939
	Boyacá	33	22	19.7	6.7	798
	Cauca	33	22	1.8	.2	64
	Valle del Cauca	22	11	2.9	1.2	77
	Huila	22	11	16.8	8.7	465
Papa	Boyacá	130	110	28.8	2.7	4054
	Cundinamarca	130	110	35.0	5.3	5133
	Antioquia	130	87	10.6	3.4	1674
	Nariño	130	87	13.3*	1.7	1877
Yuca	Cauca	44	22	2.7	.1	121
	Meta	44	22	3.7*	.3	169
	N de Santander	44	22	4.2	1.4	216
	Valle del Cauca	33	22	2.1	.4	78
Caña de Azúcar	Boyacá	44	22	13.3*	2.7	645
	Cundinamarca	44	22	17.4*	10.5	997
	Antioquia	66	33	31.7*	3.4	2204
	Nariño	66	33	14.0*	2.4	1003
	Santander	44	22	14.2*	6.1	759
Total						30721

a. Areas y cultivos donde RF para aplicación directa puede ser utilizada.

## REFERENCIAS

- León, L.A. y L.L. Hammond. 1984. Efectividad Agronómica de las Rocas Fosfóricas del Trópico Latinoamericano. En La Roca Fosfórica Fertilizante de Bajo Costo. Grupo Latinoamericano de Investigadores en Roca Fosfórica (GLIRF), Cochabamba, Bolivia.
- Cortéz, L.A. et al. 1982. Mapa de Suelos de Colombia, Ministerio de Hacienda y Crédito Público, Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC), Bogotá, Colombia.
- Cortéz, L.A. 1985. Zonificación Ecológica de Colombia, Ministerio de Hacienda y Crédito Público, IGAC, Bogotá, Colombia.
- Hughes, J.C. y R.J. Gilks. 1986. The Effect of Rock Phosphate Properties on the Extent of Fertilizer Dissolution in Soils, Australian Journal of Soil Research, 24: 209-217.
- IFDC/CIAT Phosphate Project. 1986. Annual Report 1985, Cali, Colombia (Mimeo).
- Marín, G.; J. Navas y J. Henao. 1982. La Fertilidad de los Suelos Colombianos y las Necesidades de Fertilizantes, Instituto Colombiano Agropecuario (ICA), Tibaitatá, Colombia.

## 14. ASPECTOS ECONOMICOS DEL SUMINISTRO Y USO DE FERTILIZANTES FOSFATADOS EN AMERICA LATINA

Carlos A. Baanante\*

### RESUMEN

En este documento se enfocan, en forma global para la región, los factores más importantes que afectan la demanda y oferta potencial de fertilizantes fosfatados, la importancia de la investigación agro-económica, y aspectos generales de políticas de gobierno que afectan el uso de fertilizantes y el desarrollo de la agricultura. Este enfoque se hace teniendo en cuenta las expectativas creadas por la crisis económica y financiera causada por la deuda externa, la disminución de los ingresos y de la producción de alimentos per cápita en años recientes, el aumento del desempleo, los bajos precios de los productos agrícolas debido a la situación en el mercado internacional y las políticas de precios en algunos países de la región, y considerando además, la disponibilidad de recursos naturales para la producción agrícola y la producción de fertilizantes.

### Introducción

Los factores económicos que afectan y afectarán en el futuro el suministro y uso de los fertilizantes fosfatados en América Latina están determinados por la influencia que la situación económica actual y futura de los países de la región pueda tener sobre el desarrollo económico en general, y en especial sobre el desarrollo del sector agrícola. Dado que los fertilizantes son un insumo variable en la producción agrícola, la demanda de ellos se deriva de la demanda por (producción de) productos agrícolas. El nivel de uso de fertilizantes es finalmente determinado por esta demanda y la oferta o suministro de fertilizantes a los agricultores. Por lo tanto, el suministro y uso de fertilizantes es afectado por las condiciones de mercado y políticas de gobierno que existen con respecto a (1) el sector y la producción agrícola, y (2) la producción, importación/exportación, y comercialización de fertilizantes.

En este artículo se tratan los aspectos económicos más importantes del suministro y uso de fertilizantes fosfatados en América Latina y la importancia de la investigación sobre fertilizantes fosfatados en el desarrollo de la agricultura y el sub-sector de fertilizantes. En las secciones

---

\*International Fertilizer Development Center.

siguientes se discute, primero, la situación y desarrollo general del sector agrícola y del sub-sector de fertilizantes; segundo, los factores determinantes de la demanda y del suministro de fertilizantes fosfatados, y finalmente, la importancia de la investigación tecnológica con respecto a la producción de estos fertilizantes y la investigación agroeconómica con respecto a su uso.

### Situación y Desarrollo del Sector Agrícola

El problema más serio que enfrentan los países Latinoamericanos en la actualidad es sin embargo la crisis económica y financiera causada por la deuda externa y el deterioro en la balanza de pagos debido a la disminución en el flujo de capitales a los países de la región y los bajos precios por productos de exportación. Incrementos en la producción agrícola para substituir importaciones y/o aumentar exportaciones pueden contribuir al alivio de este problema.

En el período 1960-75 América Latina alcanzó la más alta tasa de crecimiento en producción de alimento entre las regiones de países en desarrollo. Durante este período la producción de granos básicos aumentó a una tasa anual que fue cerca del 1% mayor que la tasa de crecimiento de la población. Se estima que aproximadamente el 60% de este crecimiento se debió al aumento en el área cultivada y el 40% restante como resultado de incremento en la productividad de la tierra. Desafortunadamente, desde el año 1980 la situación de producción de alimentos en la región ha sufrido un marcado deterioro.

En el período 1980-85 los ingresos per capita disminuyeron y el desempleo y el sub-empleo aumentaron como resultado de menores incrementos en el producto bruto interno y el continuo crecimiento de la población en los países de la región. La producción de alimentos per capita, y por lo tanto el autoabastecimiento de alimentos, disminuyó en la mayoría de los países de la región. Para cambiar esta situación estos países están tratando de aumentar su producción agrícola mediante programas de desarrollo que incluyen como componente importante el mayor uso de fertilizantes.

Aún cuando en algunos países de América Latina es todavía posible aumentar la producción agrícola mediante la expansión del área cultivada, en el futuro, una mayor proporción de tal aumento debe provenir de incrementos en la productividad de la tierra. En ambos casos, un mayor uso de fertilizantes será necesario para aumentar la producción agrícola. La incorporación de áreas marginales (Llanos de Colombia y Venezuela, trópico húmedo en Perú y Bolivia o el

Cerrado en Brasil) a la producción de cultivos requiere del uso de fertilizantes y sistemas de manejo apropiados para mantener la capacidad productiva de estos suelos. De igual manera, un mayor uso de fertilizantes será necesario para aumentar la productividad de las áreas actualmente bajo cultivo.

En los últimos años, el desarrollo del sector agrícola en América Latina ha sido negativamente afectado por: 1) los bajos precios de los productos agrícolas en el mercado internacional que se han presentado como consecuencia de superavits de producción en países desarrollados y algunos países en desarrollo, y 2) las políticas de precios adoptados por los gobiernos de algunos países de la región para asegurar precios bajos de los productos agrícolas a los consumidores de las ciudades en donde se tiende a concentrar la mayor parte de la población. A pesar de los precios bajos de los fertilizantes en el mercado mundial y de las políticas de subsidios al crédito y los fertilizantes en algunos países de la región, los bajos precios de los productos agrícolas han afectado negativamente los incentivos económicos para la adopción de tecnologías modernas de producción y las inversiones en el sector agrícola.

### Situación y Desarrollo del Sub-sector Fertilizantes

El consumo de nutrimentos ( $N$ ,  $P_2O_5$  y  $K_2O$ ) en América Latina aumentó en un 68% entre 1974/75 y 1984/85, la mayor parte de este aumento ocurrió en los primeros 5 años de este período (1975-80) cuando el consumo pasó de 4.3 a 6.4 millones de toneladas métricas; después el consumo disminuyó durante los 4 años siguientes (1981-84) y solo se recuperó en el año 1984/85 cuando el consumo alcanzó 7.3 millones de toneladas. Como se observa en el Cuadro 1, el consumo de fertilizantes en América Latina está concentrado en pocos países, y entre ellos, Brasil, México, Cuba, Colombia y Venezuela consumen el 85% del total, mientras que solo Brasil y México representan el 68% de este consumo. Por lo tanto, las fluctuaciones en la situación económica de estos países que influyen en su consumo de fertilizantes, afectan drásticamente el consumo global de la región.

El uso promedio de fertilizantes por área cultivada en América Latina es más bajo que en Asia y los países desarrollados. En el período 1980-85 el uso promedio de nutrimentos en América Latina fue de 15.2 kg/ha, mientras que en Estados Unidos fue aproximadamente 100 kg/ha, alcanzándose niveles aún más altos en países europeos y algunos países del Asia. Aún cuando las cifras promedio del uso de fertilizantes por hectárea cultivada no indican las disparidades que existen entre cultivos o entre áreas

Cuadro 1. Consumo de N, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> y K<sub>2</sub>O en América Latina.

Países	1974/75	Consumo en 1974/75		Consumo en 1984/85	
	vs 1984/85 (%)	(t x 10 <sup>3</sup> )	(%)	(t x 10 <sup>3</sup> )	(%)
Brasil	87.8	1.825	41.6	3.428	46.5
México	92.2	864	19.7	1.661	22.5
Cuba	96.3	302	6.9	593	8.0
Colombia	45.2	250	5.8	363	5.0
Chile	8.3	167	3.9	181	2.5
Perú	- 45.0	142	3.3	78	1.1
Venezuela	107.7	129	3.0	268	3.7
El Salvador	- 44.4	99	2.3	55	.8
República Dominicana	- 39.8	98	2.3	59	.8
Argentina	108.0	75	1.8	156	2.2
Costa Rica	30.1	73	1.8	95	1.3
Uruguay	- 22.0	68	1.6	53	.8
Guatemala	38.5	65	1.6	90	1.2
Ecuador	104.8	41	1.0	84	1.2
Otros países (a)	21.9	146	3.4	178	2.4
Latinoamérica	68.22	4.390	100.0	7.385	100.0
USA	23.24	15.941		19.646	

(a) Nicaragua, Panamá, Jamaica, Honduras, Guyana, Trinidad & Tobago, Bolivia, Surinam y Paraguay.

geográficas dentro de un país o región, estas cifras reflejan el bajo nivel tecnológico que todavía existe en importantes sectores de la producción agrícola en América Latina, y por lo tanto, el potencial para aumentar la productividad y producción agrícola a través del desarrollo y adopción de tecnologías de producción que incluyan como componente importante un mayor uso de fertilizantes.

En lo que se refiere a la producción de fertilizantes, América Latina ha aumentado su producción de 2 millones de

toneladas de nutrimentos en 1974/75 a 4.4 millones en 1984/85, incrementando del 2% al 3% su contribución a la producción mundial (Cuadro 2). La mayor parte de este aumento en producción ocurrió en Brasil y México. Los precios bajos de los fertilizantes en el mercado internacional han contribuido a la limitada expansión en la producción de fertilizantes a pesar de que América Latina posee recursos naturales para la producción de fertilizantes nitrogenados (México, Venezuela, Argentina, Chile) y fosforados (Perú, Colombia, Brasil). Con la crisis económica causada por la deuda externa, los países de la región deben renovar sus esfuerzos para explotar sus recursos naturales para la producción de fertilizantes en los próximos años a fin de ahorrar divisas y reducir el desempleo.

Cuadro 2. Producción mundial de fertilizantes (FAO, 1986).

Area	1974/75		1984/85	
	ton x 10 <sup>6</sup> nutrimentos	% Producción mundial	ton x 10 <sup>6</sup> nutrimentos	% Producción mundial
América del Norte	24.3	27	32.6	23
América Latina	2.0	2	4.4	3
Europa Occidental	21.4	23	21.8	16
Europa Oriental	10.3	11	14.0	10
Unión Soviética	17.9	20	29.3	21
Asia	12.8	14	32.5	23
África	1.8	2	3.4	2
Oceania	1.2	1	1.2	1
Total Mundial	91.7*	100	139.1*	100
Países desarrollados	7.5	87	103.0	74
Países en desarrollo	12.1	13	36.1	26

\* No se incluye roca fosfórica.

## **Determinantes de la Demanda de Fertilizantes Fosfatados**

Dado que los fertilizantes fosfatados son un insumo variable en la producción agrícola, su demanda se deriva de la demanda por productos agrícolas. La demanda de fertilizantes fosfatados depende fundamentalmente de (1) el impacto que el uso de estos fertilizantes tienen en la producción de cultivos y (2) los precios que determinan el valor económico de la producción de los cultivos. El impacto del fertilizante en la producción es determinado por los incrementos en la producción que ocurren como resultado del uso del fertilizante, o sea por la respuesta del cultivo (producción) a la aplicación del fertilizante, la cual puede ser representada cuantitativamente por la función de respuesta. Mientras que, los precios de los cultivos son determinados por las condiciones del mercado y las políticas de los gobiernos.

### **Respuesta de los Cultivos a los Fertilizantes Fosfatados**

La respuesta de la producción a la aplicación de fertilizantes fosfatados, y consecuentemente la demanda por estos fertilizantes, es afectada por una serie de factores entre los cuales se debe destacar (1) las características de los suelos, (2) el clima, (3) los cultivos y variedades, (4) el fertilizante y los métodos de aplicación, (5) el uso y manejo de otros insumos, y (6) las prácticas culturales. Con el fin de identificar los factores más importantes, que en este aspecto afectan la demanda por fertilizantes fosfatados en América Latina, es necesario determinar la influencia y relativa importancia que estos factores tienen sobre la respuesta de la producción de cultivos al uso de estos fertilizantes, en el contexto de la producción agrícola en América Latina.

Los suelos y el clima son factores ecológicos dados que pueden ser vistos como "recursos naturales" que condicionan la influencia de los otros factores, los cuales están relacionados con la tecnología de producción. Por lo tanto, los factores que a través de su efecto sobre la función de respuesta al uso de fertilizantes fosfatados, afectan la demanda de estos fertilizantes, pueden ser clasificados en (1) factores ecológicos dados o "recursos naturales" y (2) factores dependientes de la tecnología de producción.

### **Factores Ecológicos**

Los suelos y el clima son los factores ecológicos o recursos naturales que afectan fundamentalmente la producción agrícola y la demanda por fertilizantes. En el caso de los fertilizantes fosfatados las características de los suelos tienen especial importancia y en un menor grado las

condiciones climáticas. En general, la respuesta de la producción de cultivos al uso de fertilizantes fosfatados es más sensible a variaciones en características de suelos que a las variaciones en las condiciones climáticas. Por lo tanto, las características de los suelos en áreas bajo cultivo o en áreas con posibilidades para la expansión de cultivos son un determinante importante de la demanda potencial por fertilizantes fosfatados en América Latina.

Teniendo en cuenta que una mayor respuesta de la producción de cultivos al uso de (demanda por) fertilizantes fosfatados se observa en suelos con marcadas deficiencias de fósforo, las características de gran parte de los suelos en América Latina indican la importancia que estos suelos tienen como factor determinante de la demanda potencial de fertilizantes fosfatados en la región. Los suelos de los Llanos de Colombia y Venezuela y del Cerrado en Brasil, en donde existe el mayor potencial para la expansión de áreas con cultivos, presentan marcadas deficiencias de fósforo. De igual manera, deficiencias significativas de fósforo se observan en los suelos de laderas de la cordillera de los Andes y en los valles interandinos, donde tiene lugar la mayor producción de alimentos de Colombia, Ecuador, Perú y Bolivia.

### **Factores de la Tecnología de Producción**

En adición a los factores ecológicos, la respuesta de la producción agrícola al uso de fertilizantes fosfatados en América Latina es también afectada por factores propios de las tecnologías de producción ya adaptadas o que son adaptables a las condiciones de suelos y climas de la región. La demanda por fertilizantes (u otro insumo variable) es afectada por el desarrollo y la adopción de nuevas tecnologías de producción. Cambios en la tecnología de producción que afectan la respuesta de la producción al fertilizante afectan también la demanda por fertilizante. Los factores más importantes que a este respecto afectan la demanda por fertilizantes fosfatados en América Latina son:

- a) El desarrollo y la introducción de nuevas variedades con una mayor respuesta en producción al uso de fertilizantes fosfatados en cultivos importantes para la región tales como el arroz, la papa y el maíz;
- b) La introducción de nuevos fertilizantes y mejores técnicas de manejo para aplicar, no solamente fósforo, sino también nitrógeno, potasio y micronutrientes;
- c) La introducción y uso de mejores técnicas de manejo de otros insumos tales como insecticidas y fungicidas para el control de plagas y enfermedades;

- d) La introducción y adopción de mejores prácticas culturales con respecto a los diversos aspectos del manejo de los cultivos, tales como la preparación de la tierra, la siembra, el control de malezas, y la cosecha;
- e) El mejor uso de irrigación y sistemas de drenaje, y la adopción de mejores sistemas y rotación de cultivos, lo mismo que de técnicas de manejo de suelos a largo plazo.

Las instituciones nacionales de los países de la región, a través de las investigaciones que conducen y de los servicios de extensión que proporcionan a los agricultores, contribuyen significativamente al desarrollo y adopción de mejores tecnologías de producción agrícola. Los países de la región, sin embargo, enfrentan serios problemas presupuestales para financiar las investigaciones necesarias para el desarrollo de tecnologías de producción agrícola que les permitan alcanzar sus objetivos prioritarios de desarrollo económico. Los centros internacionales de investigación agrícola deben hacer esfuerzos para identificar estas necesidades al establecer sus prioridades de investigación, a fin de contribuir en forma efectiva al desarrollo de estas tecnologías y al progreso de los países de la región.

Con el fin de establecer prioridades en la investigación para el desarrollo de tecnologías de producción agrícola y comprender el impacto efectivo que estas tienen sobre la demanda de fertilizantes, se debe tener en cuenta que el desarrollo y adopción de tecnología es un proceso dinámico afectado fundamentalmente por variables económicas y sociales. La adopción por los agricultores de los diversos componentes de la tecnología de producción previamente mencionados, los cuales modifican y determinan la tecnología que en efecto se usa, depende fundamentalmente del valor de la tierra, los precios que los agricultores esperan recibir por los productos agrícolas que producen, y los precios que pagan por la mano de obra y otros insumos variables tales como fertilizantes, pesticidas, maquinaria y equipos e implementos. Por lo tanto, para una tecnología de producción dada, la demanda por fertilizantes fosfatados depende de los precios de los productos agrícolas, la mano de obra y otros insumos variables, y del valor de la tierra. En forma similar, para una situación o tendencia de precios dada, se puede y deben establecer prioridades de investigación para el desarrollo de tecnologías de producción agrícola consistentes con esta situación.

### **Los Precios de los Productos Agrícolas**

Bajo condiciones dadas de suelo y clima, precios de insumos, y tecnología de producción agrícola, los precios que los

agricultores reciben por sus productos son el determinante fundamental de la demanda por fertilizantes. Estos precios determinan el valor del incremento en la producción asociado con el uso de fertilizante y así mismo el uso de otros insumos. Mayores precios de productos agrícolas inducen el mayor uso de fertilizantes y otros insumos variables y aumentan la productividad de la tierra. Las políticas gubernamentales dirigidas a reducir estos precios tienen un efecto negativo en la producción y productividad de la agricultura.

En la mayoría de los países de América Latina los precios de los productos e insumos agrícolas son afectados por las políticas de los gobiernos, por lo que tanto, la demanda de los fertilizantes, como las prioridades de investigación y la adopción de tecnologías son también afectadas por estas políticas. Las políticas de precios adoptadas por ciertos países para asegurar precios bajos a los consumidores de las ciudades, han tenido un efecto negativo sobre la adopción de tecnologías modernas de producción agrícola, la demanda de fertilizantes y la productividad del sector agrícola en América Latina.

#### Determinantes del Suministro de Fertilizantes Fosfatados

El suministro de fertilizantes fosfatados a los agricultores en América Latina depende de (1) la disponibilidad de recursos de roca fosfórica y la capacidad de producción de estos fertilizantes, (2) la importación de materias primas y fertilizantes fosfatados, (3) la comercialización de estos fertilizantes dentro de cada país, y (4) las políticas gubernamentales que regulan estas actividades.

#### **Disponibilidad de Recursos y Producción**

Además de la importancia del fósforo como nutrimento necesario para incrementar y mantener la productividad de los suelos en América Latina, también tiene especial importancia debido a la disponibilidad de recursos de roca fosfórica en varios países de la región (Perú, Colombia, Brasil, Venezuela, México, Ecuador, Bolivia). Las reservas conocidas de roca fosfórica en América Latina representan el 4.1% de las reservas mundiales y se encuentran localizadas en su mayor parte en el Perú y en el Brasil.

Como resultado de la situación económica por la que atraviesan estos países debido a la deuda externa, la explotación de estos recursos para la producción de fertilizantes fosfatados y la sustitución de importaciones adquiere especial importancia. La explotación de estos recursos sin embargo está limitada por factores técnicos y económicos. Las características físico-químicas de las

rocas fosfóricas y la disponibilidad de materias primas suplementarias para su procesamiento son factores técnicos que limitan la explotación de estos recursos. Mientras que, la magnitud de las reservas de roca fosfórica, el tamaño del mercado y los precios de los fertilizantes en el mercado internacional son factores económicos que afectan su explotación económicamente eficiente.

La disponibilidad y bajos precios de los fertilizantes en el mercado internacional en años recientes y las políticas gubernamentales que tienden a sobrevalorar las monedas nacionales con respecto a las divisas extranjeras, han hecho difícil la explotación de recursos naturales de roca fosfórica en América Latina. En esta situación, algunos países de la región han establecido políticas de control a las importaciones de fertilizantes para proteger su producción nacional y facilitar la explotación de sus recursos naturales. El desarrollo de tecnologías de producción (y uso) de fertilizantes fosfatados, que permitan la explotación técnica y económicamente eficiente de estos recursos para suministrar fósforo a la agricultura, son importantes para el desarrollo agropecuario, industrial y económico de estos países.

#### **Importación de Fertilizantes Fosfatados y Materias Primas**

En la mayoría de los países de la región los fertilizantes fosfatados importados y los que son producidos con materia prima importada son importantes componentes del suministro total de fertilizantes fosfatados a la agricultura. Países como Bolivia y Costa Rica dependen casi exclusivamente de la importación de fertilizantes fosfatados o materias primas para abastecer su demanda, mientras que el Brasil abastece más del 90% de su demanda con fertilizantes producidos en el país. El Superfosfato Triple (SFT), el fosfato diamónico (DAP) y los fertilizantes compuestos son, por razones de costo por unidad de nutrimento, los fertilizantes más frecuentemente importados por los países de la región como fuentes de fósforo.

Los países de la región que producen fertilizantes tienen establecidas políticas gubernamentales que controlan las importaciones a través de impuestos, licencias y/o cuotas a las importaciones de fertilizantes. Estas políticas generalmente se establecen con el fin de proteger y promover la industria nacional en desarrollo, sin embargo, frecuentemente se transforman en políticas que mantienen una industria de producción ineficiente que resulta en altos precios de fertilizantes, lo cual limita el desarrollo de la agricultura. Brasil es un país que ha podido expandir su industria de producción de fertilizantes fosfatados a través de la protección brindada, en un principio por un sistema de cuotas de importación y después por un sistema de impuestos

a la importación de ciertos fertilizantes. Las políticas de control de importaciones están dirigidas principalmente a los fertilizantes y en un menor grado a las materias primas y productos intermedios (roca fosfórica, ácido sulfúrico o fosfórico).

### **Comercialización de Fertilizantes**

La comercialización de fertilizantes dentro de cada país cumple un papel extremadamente importante en el suministro y uso de fertilizantes y está íntimamente ligada con su producción y/o importación. Una comercialización eficiente de fertilizantes debe proporcionar al agricultor, al menor costo posible, los fertilizantes apropiados en el lugar y momento que este los necesita. La comercialización de fertilizantes incluye funciones de distribución, promoción y establecimiento de precios. En algunos países de América Latina, por ejemplo México, estas funciones están integradas verticalmente con la producción, bajo el control de una sola organización, lo que determina el establecimiento de monopolios controlados directa o indirectamente por el gobierno. En otros países, como por ejemplo el Brasil, estas funciones son llevadas a cabo por diferentes organizaciones, lo cual promueve la competencia y reduce la necesidad de intervención por parte del gobierno.

El establecimiento de monopolios controlados directa o indirectamente por los gobiernos en países de la región se debe a las limitaciones de mercado y las economías de escala en la producción y comercialización de fertilizantes. Sin embargo, al expandirse el mercado de los fertilizantes, es más eficiente que varias organizaciones participen en su producción y comercialización a fin de promover la competencia.

En los países de la región los costos de transporte y las ineficiencias en la producción y comercialización representan hasta un 40 a 50% del costo del fertilizante para el agricultor. Políticas de subsidios establecidas por algunos gobiernos para cubrir parte de estos costos representan importantes gastos que los gobiernos no pueden mantener por mucho tiempo.

### **Importancia de la Investigación en Fertilizantes Fosfatados**

Como se ha descrito anteriormente, la investigación sobre fertilizantes fosfatados es sólo un componente de la investigación que se lleva a cabo con el objeto de desarrollar mejores tecnologías de producción agrícola y facilitar su adopción por agricultores. Las prioridades y estrategias de esta investigación deben ser determinadas con base en la influencia que los objetivos de desarrollo,

prioridades, y políticas de los países de la región, tienen sobre:

1. La producción, comercialización y uso de fertilizantes en general y fertilizantes fosfatados en especial;
2. La adopción y uso de nuevas variedades, otros insumos variables y técnicas de manejo que afectan la efectividad de los fertilizantes fosfatados sobre la producción;
3. Las inversiones en (y el uso de) irrigación y sistemas de drenaje;
4. Los patrones, rotaciones y sistemas de cultivos;
5. Las prioridades de las instituciones nacionales con respecto a la investigación para el desarrollo y adopción de mejores tecnologías de producción agrícola; y
6. El uso de recursos naturales para la producción agrícola (nuevas tierras) y para la producción de fertilizantes fosfatados.

Los objetivos de desarrollo, prioridades, y políticas que establecen los países de la región dependen de factores económicos, sociales y políticos que afectan a estos países y que están sujetos a cambios. El establecimiento de prioridades y estrategias de investigación sobre fertilizantes fosfatados es por lo tanto un proceso dinámico que se debe ajustar periódicamente a estos cambios.

Teniendo en cuenta los factores económicos más importantes que afectan a la mayoría de los países de la región y que fueron descritos previamente, la investigación sobre fertilizantes fosfatados en América Latina debe estar dirigida a la identificación de productos fertilizantes, métodos de aplicación, y técnicas de manejo que resulten en un mayor incremento en la producción de cultivos, haciendo uso eficiente de los recursos naturales que posee la región y promoviendo el empleo y el ahorro de divisas. Otros objetivos de los países que deben considerarse en la conducción de estas investigaciones incluyen la mayor producción y productividad, incremento de los ingresos, reducción de la dependencia del mercado internacional, y la estabilidad de precios.

La investigación sobre fertilizantes fosfatados incluye dos áreas principales, una relacionada con el uso de los fertilizantes en la producción de cultivos, y otra relacionada con la producción de fertilizantes fosfatados

haciendo uso de los recursos naturales que poseen los países de la región. Las actividades en una área de investigación son complementarios e interdependientes con las actividades de la otra, y requieren de la participación y el esfuerzo coordinado de un equipo de personas especialistas en varias disciplinas--agrónomos, científicos de suelos, ingenieros, economistas y sociólogos.

La importancia que la investigación sobre fertilizantes fosfatados tiene para los países de América Latina está claramente determinada por (1) la importancia del fósforo como nutrimento necesario para la producción agrícola en suelos donde existe el mayor potencial para la expansión del área cultivada en la región (Llanos de Colombia y Venezuela, trópico húmedo de Perú y Bolivia y el Cerrado en Brasil), y para la producción de alimentos en los valles interandinos; y 2) la disponibilidad de recursos de roca fosfórica en varios países de la región--aproximadamente 4.1% de las reservas mundiales.

IV. Uso de Fertilizantes Fosfatados en América  
Latina. Aspecto Social

## 15. PATRONES DE MANEJO DE SUELOS Y USO DE FERTILIZANTES FOSFATADOS ENTRE PRODUCTORES DE ARROZ EN SECANO EN EL META, COLOMBIA

Elizabeth de G.R. Hansen\*

### RESUMEN

En este documento se examinan las decisiones que sobre manejo de suelos y uso de fertilizantes toman los agricultores que explotan tierras de frontera con arroz comercial en el Meta, Colombia, para identificar entre ellos tipos de agricultores o "dominios de recomendación" para ensayos en fincas con fertilizantes. Las variaciones en los objetivos de los agricultores están relacionadas con el tamaño de la finca y la clase social las cuales coinciden con un amplio rango de prácticas de manejo de la fertilidad del suelo y tipos de fertilizantes usados. El desempeño del sistema de la entrega de tecnología, el cual incluye crédito, servicio de extensión y acceso a facilidades de mercadeo, también se relacionó con la forma como los agricultores usan los fertilizantes fosfatados. El trabajo encontró que se pueden identificar dos diferentes dominios de recomendaciones o tipos de fincas con diferentes estrategias para efectuar ensayos con fertilizantes fosfatados en este sistema de producción.

### Introducción

Con el fin de extender los resultados satisfactorios de la investigación del Proyecto Fósforo (IFDC/CIAT) sobre el uso de la roca fosfórica como fertilizantes en arroz, a la etapa de evaluación a nivel de finca, se emprendió una investigación sobre el manejo de la tierra y el uso de fertilizantes por parte de los agricultores de arroz de secano en la región del piedemonte en el Meta, Colombia. La investigación se desarrolló durante los años 1982 y 1983 y demostró que en esta región existen dos patrones básicos de manejo de suelos que junto con el uso de fertilizantes y el suministro de tecnología agrícola, dependen de la clase social de los agricultores. En este sentido, los agricultores que utilizan más intensamente su tierra la fertilizan menos y por lo tanto existe un alto potencial de degradación de estos suelos.

---

\* Antropóloga, Fundación Rockefeller, Proyecto Fósforo IFDC/CIAT/CIID. 309 E. 108 St., New York, N.Y. 10029, USA.

Estos resultados, de manera general, tienen implicaciones en la forma como la investigación sobre fertilizantes contribuye a la estabilidad del suministro de alimentos y a la conservación de importantes recursos naturales, y de manera específica afectarían el diseño de las futuras pruebas a nivel de finca con la tecnología de uso de roca fosfórica.

### El Cultivo

La historia y la economía política del cultivo del arroz en Colombia han sido descritas por Leurquin (1967), Scobie y Posada (1977), IICA (1980), de Janvry (1981), Perry (1983) y Hansen (1986) entre otros. El cultivo actual del arroz en Colombia es extensivo en cuanto al uso de la tierra, e intensivo en cuanto a la utilización de tecnología agrícola moderna. Se ha descrito como una agricultura "comercial capitalista" en contraste con la "producción de cultivos por campesinos o pequeños agricultores" (de Janvry, 1981). La diferencia se basa en la distribución de las tierras. El sector comercial tiene acceso a las tierras más fértiles y fácilmente mecanizables y además recibe el apoyo estatal para la producción de ciertos cultivos que por su exportación generan divisas, o son insumos industriales, o proveen alimento barato en las ciudades, lo que ayuda a mantener bajo el costo de la mano de obra industrial.

En este sentido el arroz en Colombia ha sido un cultivo de diagnóstico. Desde 1950, el sistema de producción no mecanizado que depende de la lluvia (usado principalmente por agricultores pequeños quienes emplean la mano de obra de su familia) ha sido reemplazado por el sistema de producción mecanizado y con riego utilizado por los agricultores comerciales quienes contratan la mano de obra. Los incrementos espectaculares en producción durante este período acompañados por los precios bajos del arroz para el consumidor han duplicado el promedio de consumo per cápita. En la medida en que los otros alimentos tradicionales se encarecían, el arroz se convirtió en un alimento de crucial importancia para la población de bajos ingresos en Colombia.

Además de tener acceso a tierra, crédito y mercados adecuados, los cultivadores de arroz han sido favorecidos con variedades de alto rendimiento como resultado de la investigación del CIAT. La ley 5a. de 1973 se aprobó para desarrollar un marco institucional que asegurara la transferencia de nueva tecnología a los agricultores. La Ley 5a. ata el uso de semilla de nuevas variedades al crédito agrícola del Fondo Financiero Agropecuario (FFAP).

Así, el apoyo tecnológico y financiero que se provee a los cultivadores de arroz contrasta significativamente con el

que se provee a los agricultores que cultivan otras especies con las que el Proyecto Fósforo ha trabajado en pruebas a nivel de finca, como por ejemplo el frijol y la yuca, que hasta fines de la década de los 70 fueron cultivados mayormente por el sector campesino generalmente ignorado y que no posee capital (Ferry, 1983; de Janvry, 1981).

Sin embargo, a pesar del apoyo que se les ha dado, los cultivadores de arroz se enfrentan a una relación costos - precios muy cerrada que afecta tanto el uso y manejo de las tierras arroceras, como las fluctuaciones en la cantidad de tierra sembrada de arroz y así causa inestabilidad en la producción de este alimento esencial. Por ejemplo entre 1978 y 1982, los costos de producción por hectárea aumentaron en más de un 5% especialmente como resultado del incremento de los precios de los insumos agrícolas importados. Al mismo tiempo, los precios recibidos por los agricultores registraron un descenso acumulado del 17.9% en 1983, la producción había bajado 200,000 toneladas, y los cultivadores de arroz trataban de crear una escasez artificial mediante las exportaciones aumentando así el precio interno del producto (Sin Clavijo, 1983; U.S. Department of Agriculture, 1983).

### La Región de la Investigación

En el Departamento del Meta la relación costo precio que afecta la industria arroceras colombiana interactúa con la historia del desarrollo de la región en lo que se refiere a la producción de patrones de manejo de tierra y a los patrones de uso de fertilizante. El Departamento del Meta ubicado en el Sureste de Colombia en el piedemonte de los Andes (Figura 1), es una de las regiones más importantes de Colombia en la producción de arroz (Fedearroz, 1981a, 1981b). Entre 1965 y 1982 la superficie sembrada en arroz varió de 40,000 a 100,000 hectáreas. En el Meta el arroz se cultiva a 400-500 msnm; la precipitación promedio es de 2.8 m y la época de lluvia empieza en marzo y los meses de sequía son diciembre, enero y febrero. La temperatura promedio es de 25° C con una máxima promedio de 31° C en los meses de febrero y marzo y una mínima promedio de 21° C en los meses de julio y agosto. La humedad relativa es más alta en junio (85%) y más baja en febrero (65%).

Cuando el arroz se cultiva bajo riego, se siembra en los suelos de terrazas altas que son ácidos, de relativa baja fertilidad y bajos en fósforo. Se riega por gravedad con el agua de los ríos Guatiquia, Ocoa Upia, y Huméa. Cuando el volumen de agua en los ríos permite, se hace una segunda cosecha, o de lo contrario, la tierra se siembra en sorgo o se le introduce ganado.



Figura.1. Localización del Departamento del Meta en Colombia.

El arroz en secano se cultiva a lo largo de los ríos en suelos aluviales que son de una calidad variable pero mucho más fértiles que los suelos ácidos de las terrazas altas (Figura 2). En los suelos aluviales la cantidad de fósforo varía entre 15 y 92 ppm mientras que en los suelos de terrazas altas, la cantidad de fósforo es muy baja (Owen y Sánchez, 1979).

La superficie promedio de los lotes es de 75 y 35 ha para arroz bajo riego y arroz en secano, respectivamente. Aunque 32% de los lotes tienen entre 20 y 60 ha solo cubren el 17.1% del área sembrada de arroz, el 56.4% del área, es sembrada en lotes de más de 100 ha.

Aunque hay poca capacidad para el secado del arroz se encuentran 46 molinos en el área, incluyendo una planta para procesamiento de arroz precocido para exportación y consumo doméstico. El 70% del arroz producido en el Meta sale del departamento para su distribución en el resto del país. Pero este alto nivel de producción arroceras es reciente. En los años 50 el piedemonte producía solo el 5% del arroz en Colombia. En ese entonces el Meta y todos los Llanos Orientales constituían la región ganadera más extensa de Colombia. Se utilizaba el arroz en secano no mecanizado como un cultivo "civilizador" para reemplazar el bosque tropical que ahí se encontraba con potreros para engordar el ganado criado en los llanos del Meta y Casanare.

La alta migración al Meta en 1950 reunió diferentes tipos de agricultores de varios grupos socioeconómicos en suelos específicos. En esa época trabajadores colonos y campesinos que escapaban de la violencia, compraron o tomaron posesión de la tierra fértil aluvial, donde sin equipos, cultivaron especies de subsistencia como arroz en secano, maíz, plátano y yuca (Molano, 1981). En contraste, los agricultores acomodados de las regiones centrales del país, quienes cultivaban arroz bajo riego y buscaban tierras baratas, compraron o alquilaron grandes extensiones de tierra en los suelos ácidos e infértiles que habían sido utilizados para la cría extensiva de ganado.

Para estos últimos, el cambio de los suelos fértiles a los suelos poco costosos pero infértiles del Meta fue posible porque el riego aplicado al arroz crea condiciones anaeróbicas que aumentan el pH del suelo y el nivel de fósforo disponible para la planta y baja la cantidad de aluminio tóxico de la solución del suelo (León, 1981).

Aunque al principio se cultivó arroz principalmente en suelos aluviales, por los años 60 predominó el arroz bajo riego. En los suelos aluviales, agricultores pioneros y compradores de segunda generación cultivaron algodón o maíz;

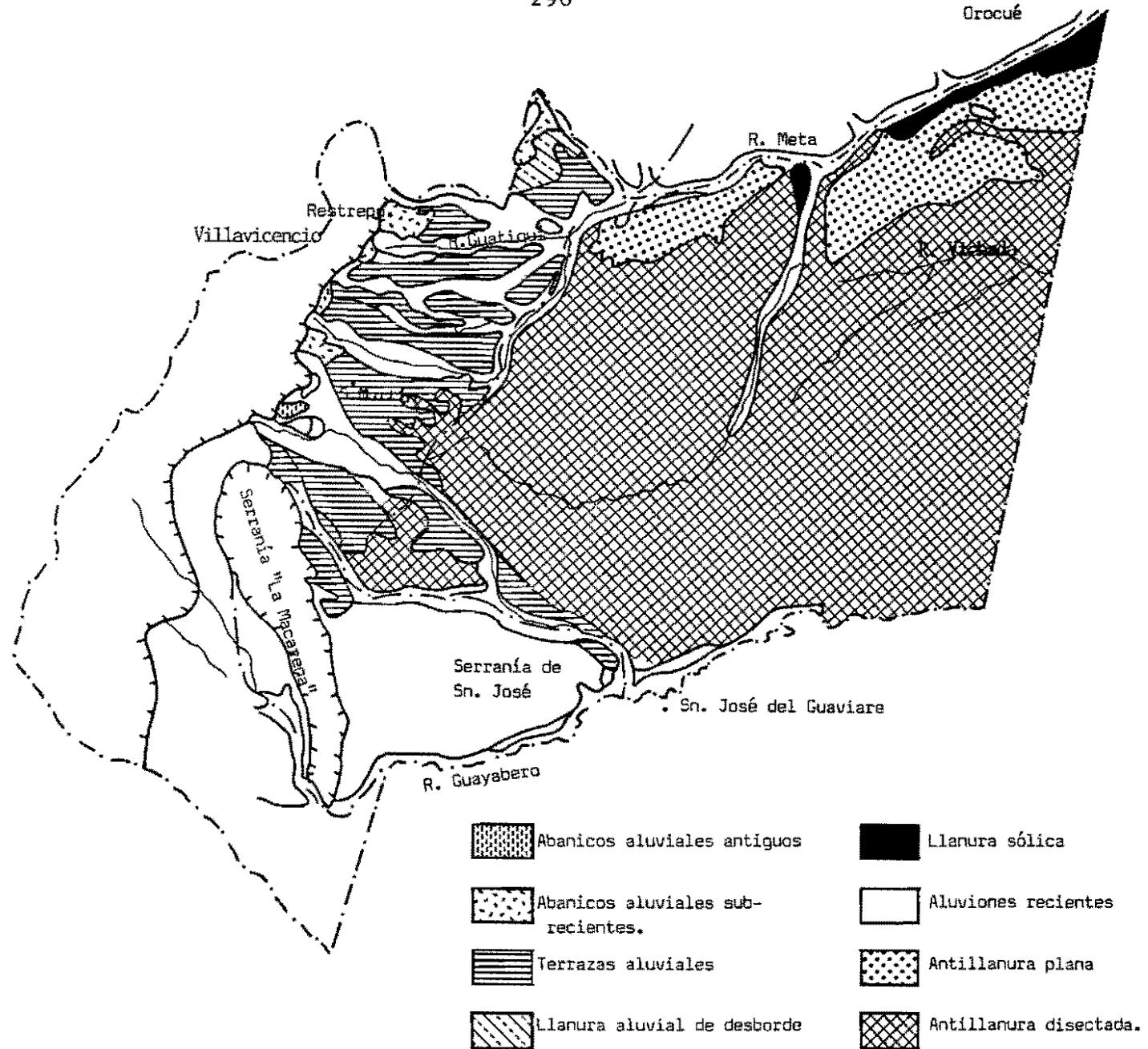


Figura 2. Los suelos del departamento del Meta.

y los ganaderos empezaron a utilizar maiz como cultivo "civilizador" para preparar o renovar potreros de engorde. El arroz regado por la lluvia no podía competir con la producción bajo riego, particularmente después de la introducción de variedades de alto rendimiento en los últimos años de la década del 60.

En 1978 se introdujo la legendaria variedad CICA 8 y como resultado de esto nuevamente volvieron a la producción arroceras los suelos aluviales. Aunque fue desarrollada para condiciones de riego, CICA 8 también podía ser sembrada en suelos fértiles bajo condiciones de secano. Los costos bajaron porque se eliminó la mano de obra para la preparación de los campos para el riego, la supervisión de suministro de agua, y el mantenimiento de diques de riego. Los rendimientos en suelos aluviales fueron iguales y a veces superiores a los de campos bajo riego (Scobie y Posada, 1977).

El descenso en los mercados del maiz y del algodón coincidió con el renacimiento del arroz en secano. Así el surgimiento de una tecnología mecanizada para arroz en secano permitió que otros tipos de agricultores sembraran arroz además de los que utilizaban riego, mientras que éstos, diversificaron su producción con arroz de secano y los ganaderos en suelos aluviales empezaron a utilizar otra vez el arroz en la preparación y renovación de potreros y los colonos y otros agricultores con fincas relativamente pequeñas en los suelos aluviales, quienes previamente habían sembrado maiz o algodón, volvieron a la siembra del arroz. Finalmente, profesionales tales como agrónomos, pilotos de fumigación, médicos, veterinarios y contadores también invirtieron en arroz. El requisito de la Ley 5a. de que todos los cultivos sembrados con crédito del FFAP debían ser supervisados por asistentes técnicos, hizo que la ausencia de experiencia previa en agricultura no fuera importante para muchos negociantes urbanos quienes hicieron inversiones en el cultivo.

La producción arroceras es una empresa muy volátil. La Figura 3 muestra las fuertes variaciones en la cantidad de tierra sembrada en arroz entre 1965 y 1983 en el piedemonte llanero. La razón principal que permite a los agricultores responder tan agilmente a los cambios en costos, mercados y tecnologías para la producción arroceras, es la estructura de tenencia de la tierra en el piedemonte llanero. Para los fines de este informe, no es necesario revisar muy profundamente los trabajos que muestran que tan desigual esta distribuida la tierra en Colombia y en los Llanos Orientales (De Janvry, 1981; Ferry, 1983; DANE, 1977; Duff, 1968; Marsh, 1983); es suficiente anotar que la mayoría de

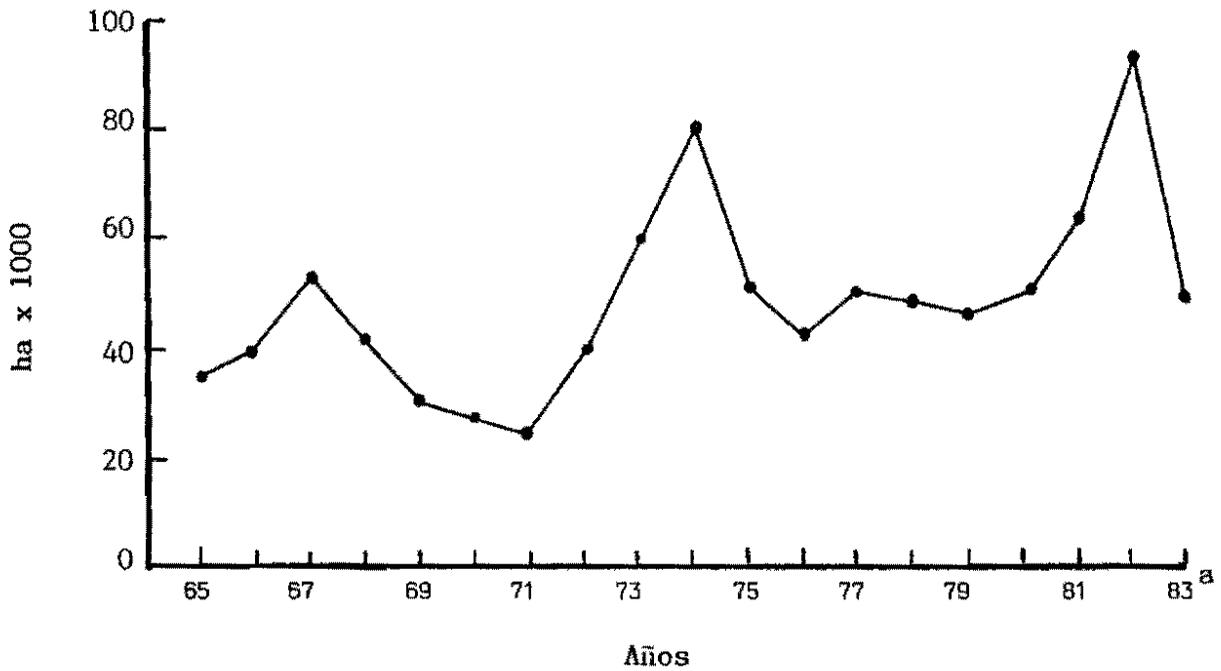


Figura 3. Superficie sembrada de arroz en el Meta, de 1965 a 1983

<sup>a</sup>Solamente 1983A  
 Fuentes: ICA, 1982a,  
 1982b, 1983

la tierra (75%) sembrada de arroz en el piedemonte -- tanto en arroz de riego como en arroz de secano -- es arrendada según estimó en 1981 la Federación de Arroceros. Según los contratos, la tierra puede ser alquilada por un semestre, por uno o por tres años, aunque lo primero es lo más común. Los contratos estipulan que el dueño no pagará por las mejoras en el terreno y además, los dueños pueden requerir que el terreno sea entregado sembrado con pasto, continuando así la tradición del uso de cultivos como "civilizadores".

### La Metodología de Investigación

La investigación se basó en varios procedimientos.

Investigaciones documentales sobre la historia regional y entrevistas con informantes claves suministraron la información básica sobre la estructura agraria del área y la producción de arroz bajo riego y en secano. Se decidió limitar la investigación a agricultores de arroz en secano bajo la presunción de que los costos más bajos para este sistema de cultivo lo haría más accesible a un rango socio económico más amplio de agricultores, y que el número de estrategias de manejo sería, por lo tanto, también mayor.

En 1982, una muestra arbitraria de 33 informantes fue desarrollada como extensión de la red original de informantes claves. Se diseñaron las encuestas con el propósito de enfatizar la historia familiar de la migración al Meta, la tenencia de la tierra y la utilización de fertilizantes. Se usaron datos de estas encuestas para seleccionar las fincas donde se harían pruebas durante un semestre con la tecnología "roca fosfórica" y para diseñar el "control agricultor" -- la tecnología usada por los agricultores -- para las pruebas que se llevaron a cabo en 1983 en 12 fincas del Piedemonte (Apéndice 1).

En la misma época, se llevó a cabo una entrevista de una hora con 47 agricultores (Cuadro 1) con el fin de ensayar una serie de hipótesis sobre intensidad del cultivo y la relación entre la producción de ganado y la producción de arroz.

Se concentró el trabajo en las tres subregiones donde se llevaron a cabo las pruebas a nivel de fincas: en la cuenca del Río Ariari hacia el sur de Villavicencio; en el área directamente al este de Villavicencio donde el cultivo de arroz comercial ha tenido una larga tradición, y finalmente al norte de Villavicencio en Cumaral y Paratebueno, donde los suelos aluviales habían sido tradicionalmente sembrados para potreros de engorde.

Cuadro 1. Tipo de empresarios según su propiedad en ganado y porcentaje de tierra propia sembrada de arroz.

Tipo de empresario	Número promedio de cabezas ganado	Tierra propia sembrada de arroz (%)	Hectáreas cubiertas por la muestra (%)	N	Z
Netamente arrocero	0	92.9	32.0	8	17.02
De producción mixta	123	68.1	45.0	22	46.8
Ganaderos	410	20.8	8.1	8	17.01
Inversionistas	161*	0	14.9	9	19.0
			100.0	47	100.0

\* Pertenecen a dos inversionistas urbanos y son mantenidas en tierras distintas a las arrendadas para la producción de arroz.

### Los Resultados de la Investigación

#### **La Muestra: Tipo de Agricultor, Clase Social y Patrones Principales de Manejo de Suelo**

Como grupo, los agricultores en la muestra se caracterizaban por la opulencia general que distingue al agricultor comercial del agricultor campesino. Por lo general tenían cierto nivel académico; solo el 6.4% no había asistido a la escuela y el 25.5% había asistido a la universidad. La mayoría procedía de zonas urbanas, y estaban afiliados a asociaciones nacionales de agricultura. El 80% tenía más de 10 años de experiencia en la región y habían comenzado su carrera de arroceros con la agricultura mecanizada y comercial. Entre los agricultores el 19.2% eran dueños de una o dos combinadas, el 78.7% tenía uno o más tractores, el 75.0% tenía vehículos pesados para transporte, y el 86% tenían empleados permanentes en sus fincas.

Dentro del grupo, el 85% sembró con crédito del FFAP durante un año en el cual los bancos limitaron sus préstamos. El 93% sembró contratando la asistencia de un agrónomo profesional.

Aunque los agricultores en esta muestra eran identificados fácilmente como agricultores comerciales y capitalizados, la muestra no fue homogénea. Fueron identificados cuatro tipos de empresarios agrícolas (1) Agricultores netamente arroceros cuya actividad principal era el cultivo de arroz; (2) Agricultores de producción mixta quienes cultivan arroz y otras especies y que también criaban ganado; (3) Ganaderos quienes cultivaban arroz con el fin de preparar la tierra para su uso subsecuente como potreros; y (4) Inversionistas con otros recursos económicos, quienes cultivaban arroz como una fuente adicional de ingresos. El Cuadro 1 muestra las características de los cuatro tipos de empresarios agrícolas.

El número total de hectáreas sembradas de arroz, tanto bajo riego como en seco, se tomó como la base indicadora de la clase social del agricultor. Los empresarios del Cuadro 1 se clasificaron por categorías según el área sembrada de arroz: categoría 1 para los que sembraron entre 1 y 49 ha; categoría 2 para los que sembraron entre 50 y 99 ha; y categoría 3 para los que sembraron más de 100 ha en arroz (Cuadro 2).

Cuadro 2. Categorías de empresarios según el tamaño de la finca.

Categoría y número de hectáreas	Agricultores				Total
	Arrocero (%)	Producción mixta (%)	Ganaderos (%)	Inversionistas (%)	
1 0-49	0	17.0	10.7	10.6	38.3
2 50-99	6.4	17.0	2.1	6.4	31.9
3 100 ó más	10.6	12.8	4.3	2.1	19.8
Total	17.0	46.8	17.0	19.2	100.0

La clasificación de los agricultores según el tipo empresarial permitió identificar los dos patrones principales de manejo de los suelos aluviales usados por los

arroceros en el piedemonte llanero. En uno de ellos, la tierra se cultiva durante dos estaciones como preparación para sembrar potreros que solo serán renovados en 10-12 años; este es el "patrón ganadero", y fue también usado por los agricultores de cultivos mixtos cuando preparaban o renovaban potreros; en el otro, "el patrón agrícola," usado solo por los agricultores, la tierra es cultivada continuamente, al menos en teoría.

Mientras que las metas empresariales de los agricultores indicaban los patrones principales en el uso de la tierra a largo plazo, la clase social del agricultor se relacionó con una gama de prácticas de manejo de fertilidad, principalmente en el "patrón agrícola". El número de hectáreas sembradas de arroz también se relacionó con las características de estilo de vida que incidían en el acceso a nuevas tecnologías para el cultivo de arroz. La residencia urbana y la propiedad de un automóvil, por ejemplo, aumentaron en proporción directa con el número de hectáreas sembradas, como se ve en el Cuadro 3. En realidad, la relación es más fuerte que la que muestra el Cuadro 3, porque los pequeños cultivos de los ganaderos por su tamaño se han incluido en la categoría 1. En Colombia los propietarios de casas urbanas y automóviles tienen los niveles más altos de gastos personales y de consumo. La investigación muestra también que tienen mayor acceso a crédito, información y oportunidades de mercadeo que los agricultores pequeños.

Cuadro 3. Características del estilo de vida (residencia urbana y propiedad de automóvil) por categoría de empresario.

Categoría	Con residencia urbana (%)	Propietario de automóvil (%)
1	16.7	50.0
2	40.0	80.0
3	85.7	100.0

Las prácticas de manejo y fertilización de suelo variaron con el número de hectáreas sembradas; entre ellas se pueden citar: las variaciones en la cantidad de tierra en arriendo, la mezcla en los cultivos de arroz de riego y arroz de secano; la estabilidad de producción de año a año, la intensidad del cultivo y las variaciones en la fertilización del cultivo tanto con los fertilizantes de N y K, como con los fertilizantes fosfóricos y las maneras de aplicarlos.

### Tenencia de la Tierra, Mezcla de Cultivos y Estabilidad de la Producción

En el primer semestre de 1983 el número de hectáreas sembradas de arroz en el piedemonte llanero bajó de 80,900 a 50,000 ha, debido a los precios bajos y a la inseguridad de la variedad sembrada que había perdido su resistencia a las enfermedades (ICA, 1982b; 1982c; 1983). Por esta razón la muestra se sesgó a favor del uso regular de la tierra y de agricultores establecidos, en contra de los inversionistas transitorios.

Sin embargo, el alquiler de tierra fue importante para la mayoría de los agricultores de la muestra con la excepción de los ganaderos. Más de la mitad (53.1%) de la tierra sembrada de arroz por los agricultores encuestados había sido alquilada, y el 72% de los agricultores alquilan tierra, la mitad porque no tenían tierra propia y la otra mitad para complementar sus propiedades. El Cuadro 4 muestra la distribución de los agricultores que sembraron en tierra propia, en tierra alquilada o en ambas. La proporción de agricultores que trabajaron solamente con tierra alquilada fue mayor entre los que sembraron menos de 100 ha, y el porcentaje de los agricultores que además de sus tierras alquilan otras es mayor en la categoría 3 (más de 100 ha).

Cuadro 4. Tenencia de la tierra entre los agricultores según la categoría de empresario.

Categoría	Tierra propia	Alquilada	Tierra propia	Totales
	Únicamente	únicamente	y alquilada	
	(%)	(%)	(%)	
1	50.0	38.9	11.1	100
2	13.3	46.7	40.0	100
3	14.3	21.4	64.3	100
Totales	27.3	36.2	36.2	100

También, como lo muestra el Cuadro 5, la mezcla entre cultivos (arroz bajo riego y arroz en seco) varió con el número de hectáreas sembradas. La producción de arroz en seco en suelos aluviales fue más común entre los agricultores que sembraron menos de 100 ha -- predominan los agricultores de producción mixta y los ganaderos -- en cuanto que la proporción de tierra sembrada de arroz bajo

riego en suelos ácidos predominó entre los que sembraron más de 100 hectáreas.

Cuadro 5. Porcentaje de la superficie en arroz en seco por categoría de empresario y tipo de agricultor.

Categoría	Agricultor			Inversión/ suplemento (%)	Total del arroz en secano (%)
	Arrocero	Producción mixta	Ganadero		
	(%)	(%)	(%)		
1	0	83.7	100.0	88.0	89.8
2	53.9	67.5	100.0	67.4	65.8
3	46.1	58.1	61.0	62.9	52.7
Total	45.2	62.9	80.5	70.6	59.7

La encuesta mostró que fueron estos últimos agricultores quienes redujeron la superficie de tierra alquilada durante los años de ganancias inciertas. Entre los agricultores encuestados sólo hubo un descenso del 9.2% entre la cantidad de tierra que ellos sembraron en 1982 y la que sembraron en 1983. Aún así, la mayor disminución fue causada por los inversionistas y los cultivadores netos de arroz, y fue mayor entre los primeros, los cuales redujeron la superficie sembrada en un 44%. El descenso fue mayor en la categoría 3 donde un solo inversionista en 1982 sembró 790 ha de arroz bajo riego y seco, pero en 1983 se limitó a 270 ha de arroz en seco.

El análisis de la tenencia de la tierra, mezcla de cultivo y constancia productiva entre estos agricultores, muestra como los agricultores en propiedad -- especialmente los grandes inversionistas -- pueden generar importantes oscilaciones en la producción arroceras. Lo que sugiere que son los suelos ácidos de la terraza alta los que salen de la producción durante los años de ganancia incierta, mientras que los suelos aluviales continúan en ella.

La investigación mostró de este modo, como el marco general de tenencia de las tierras incide, no sólo en el nivel de producción arroceras sino también en los patrones de manejo del suelo a largo plazo.

### Intensidad de Utilización de los Suelos

La hipótesis anterior fue apoyada por las respuestas a una serie de preguntas sobre las rotaciones de cultivos en los lotes arroceros y sobre la práctica de dejar el suelo en barbecho. Los agricultores de arroz en secano dicen que no dejan en barbecho sus suelos aluviales. La práctica de dejar en barbecho por 2-4 años los campos de cultivos se discontinuó con el advenimiento de la mecanización y de los herbicidas. Los agricultores de cultivos mixtos que siembran menos de 100 hectáreas dicen que no permiten que su tierra descansa ni "diez minutos," y la cultivan constantemente.

Sin embargo, aproximadamente solo la mitad de las hectáreas cubiertas por la encuesta serían sembradas con otras especies después de la cosecha de arroz. La otra mitad tendría un período de descanso de pastoreo en rastrojo. La diferencia en el uso intensivo de la tierra depende de si es propia o alquilada. En los Cuadros 6 y 7 se puede ver que: Primero, la mayor intensidad en el uso agrícola de la tierra (tanto propia como en alquiler) se da entre los agricultores de las categorías 1 y 2; segundo, que los ganaderos sembraron sus pequeños lotes en potreros (15% del área sembrada por agricultores en la categoría 1), y tercero, que tan importante fue el pastoreo en el rastrojo entre los grandes arroceros con tierra propia como en la tierra alquilada.

Cuadro 6. Uso de la tierra propia (suelos aluviales) por categoría de empresario.

Categoría	Cultivo (%)	Banado en rastrojo (%)	Potrero (%)	Tierra sin uso (%)	Otro sin respuesta (%)	Total
1	74.5	10.5	15.0	0	0	100.0
2	81.9	0	0	2.7	15.4	100.0
3	43.7	42.2	3.0	11.1	0	100.0
Total	57.7	27.2	5.2	7.0	2.9	100.0

Cuadro 7. Uso de la tierra alquilada (suelos aluviales) por categoría de empresario.

Categoría	Ganado en		Potrero	Tierra sin uso	Otro sin respuesta	Total
	Cultivo (%)	rastrojo (%)				
1	38.1	30.4	2.2	5.5	23.8	100.0
2	86.5	5.7	0	7.8	0	100.0
3	27.8	55.0	0	15.0	2.2	100.0
Total	43.1	40.2	0.3	12.1	4.3	100.0

Según los agricultores encuestados, la tierra en arriendo era ofrecida en arriendo por cinco categorías de personas naturales o jurídicas. Como se muestra en el Cuadro 8, el mayor número de lotes en alquiler fueron ofrecidos por "pequeños agricultores muy pobres para sembrar arroz," o "ganaderos pequeños," (37.5%) (ver el patrón ganadero). Después el 25% de los lotes en arriendo fueron provistos por "familiares". Los arreglos entre familiares ocurrieron principalmente entre agricultores de cultivos mixtos de menos de 100 ha (categorías 1 y 2) en la cuenca del Ariari. El 17.5% y el 12.5% de los lotes fueron provistos por "ganaderos," y empresarios terratenientes descritos como "Uno que tiene la tierra ahí para eso," respectivamente. Finalmente, el 7.5% de los lotes fue suministrado por uno de varios socios en una "Compañía formada para producir arroz.

Los Cuadros 6, 7 y 8 muestran como los dos patrones de uso de tierra (el "patrón agrícola," y el "patrón ganadero") pueden manifestarse a través de las relaciones de alquiler. Los alquileres entre los agricultores grandes se relacionaron con la baja utilización de la tierra, pero el alquiler y el préstamo de parcelas de arroz entre los miembros de familia de agricultores de producción mixta, especialmente en la cuenca del Ariari, contribuyeron a crear un patrón de cultivo más intenso.

Tales patrones indican la existencia de presión sobre los mejores suelos de la región. Aunque los suelos aluviales generalmente son altos en fósforo, los análisis (Bray II) efectuados por el Proyecto Fósforo (IFDC/CIAT) en 1982-83 mostraron concentraciones de fósforo por debajo de 100 ppm, lo que sugiere un proceso de degradación del suelo.

Cuadro 8. Tipo de empresario de parcelas alquiladas (suelos aluviales) por categoría del inquilino.

Categoría del inquilino	Empresario				
	Pequeño agricultor o ganadero (%)	Familiares (%)	Ganadero (%)	terratendiente (%)	Compañía* (%)
1	26.6	30.0	28.6	20.0	0
2	33.3	50.0	28.6	40.0	33.0
3	40.0	20.0	42.8	40.0	66.7
Total	37.5 (100.0)	25.0 (100.0)	17.5 (100.0)	12.5 (100.0)	7.5 (100.0)

\* La tierra en compañía es propiedad de uno o más socios.

### El Patrón Agricultor: Fertilización con fósforo

Además de que los grandes agricultores de producción mixta que sembraron menos de 100 hectáreas utilizaron sus lotes más intensivamente, la investigación mostró que también aplicaron menos fertilizante. Los patrones de fertilización con fósforo son un ejemplo claro del efecto de la clase social del agricultor sobre el manejo de la fertilidad del suelo. Tanto el uso, como las fuentes, los métodos de aplicación y las cantidades de P aplicadas variaron con el número de hectáreas sembradas.

Los agricultores en la muestra usaron tres patrones de fertilización que se nombraron así: "Sin P," "compuesto," y "Alta Tecnología. "Sin P" se refiere a la falta de uso de fósforo; "Compuesto" hace alusión al uso de un fertilizante completo (NPK) tal como 15-15-15 como fuente de fósforo; y "Alta Tecnología" se refiere al uso de fosfato diamonio (DAF) o de fuentes de lenta disolución tales como escoria básica o roca fosfórica molida.

El Cuadro 9 muestra como el uso de fertilizante fosfórico y la fuente del fósforo varió con el número de hectáreas sembradas. La mitad de los agricultores en la categoría 1 no utilizaron fósforo. En esta categoría los usuarios de "Alta Tecnología" son los ganaderos que sembraron campos de

menos de 50 ha. La proporción de agricultores en los patrones "Sin P" y "Compuestos" declinó marcadamente en la medida en que aumentó el número de hectáreas. Los usuarios de "Alta Tecnología" predominaron entre los agricultores grandes y los ganaderos.

Cuadro 9. Fuentes de fósforo entre agricultores de arroz en seco por categoría de empresario.

Categoría	Sin P (%)	Compuesto (%)	Alta tecnología (%)	Totales
1	50.0	33.3	16.7	100.0
2	40.0	20.0	40.0	100.0
3	21.4	7.2	71.4	100.0
Total	38.3	21.3	40.4	100.0

Las prácticas de aplicar fertilizantes también fueron relacionadas con la superficie sembrada. Aunque la estación regional del ICA (La Libertad) recomienda aplicar fósforo al momento de la siembra, el 60% de los agricultores lo aplicaron junto con el nitrógeno y el potasio a los 20 y 50 días de la germinación. Aplicaciones pre-siembra o a la siembra aumentaron con el patrón "Alta Tecnología", y siempre según el número de hectáreas sembradas (Hansen 1983).

La cantidad de fertilizante fosfórico aplicada también varió con la superficie sembrada. El Cuadro 10 no solamente muestra el uso de menos fertilizante compuesto por parte de los arroceros que sembraron menos de 50 ha, sino que también implica un nivel de conocimiento que varía con la clase social de agricultor. Así, los agricultores grandes y los ganaderos sabían de la susceptibilidad de la variedad sembrada en 1983 (Mética 1) a la enfermedad, *Fyricualria oryzae*. El nitrógeno aumenta la vulnerabilidad de la planta a la enfermedad, y por eso mermaron la cantidad de los fertilizantes completos que incluyen nitrógeno. Independientemente del tamaño de los lotes cultivados por los ganaderos, su status social les dió acceso a las mismas fuentes de tecnología usada por los agricultores más grandes de Villavicencio.

Cuadro 10. Cantidad promedio de DAP o fertilizante compuesto aplicada según la categoría de empresario.

Categoría	Compuesto (15-15-15) (kg/ha)	DAP (18-46-01) (kg/ha)
1	80	62.5
2	133	66.6
3	100	61.6
Promedio	100	61.5

Vale la pena señalar que todos los agricultores, menos dos, de los que sembraron en tierra alquilada dijeron que no cambiaron sus patrones de fertilización en la tierra arrendada. Esto se debió a que la muestra se sesgó a los agricultores que tenían relaciones estables con los que ofrecían la tierra en arriendo. Es probable que en años de mayor siembra el efecto del arriendo en los patrones de fertilización sea diferente. (Hansen, 1983).

#### El Patrón Ganadero: Uso de Diferentes Especies de Gramíneas y Sistemas de Fertilización

La investigación demostró que el uso de un cultivo "civilizador" para la preparación del potrero -- el "Patrón Ganadero" -- fue usado por los ganaderos y por el 84% de los agricultores de producción mixta. Este patrón se hace más constante por los contratos de arriendo. Aunque entre los agricultores encuestados, a ninguno se le exigió devolver la tierra sembrada con pasto como condición de alquiler, todos conocían esta práctica. Los agricultores en el área de Cumaral/Paratebueno dijeron que las grandes áreas de Brachiaria decumbens en la región fueron sembradas después de los alquileres de los años de mayor auge de la variedad CICA 8 en 1980-81.

Todos los que sembraban arroz y pastos con el "Patrón Ganadero" decían que fertilizaban de manera similar, pero a pesar de lo que decían, se notaban las variaciones introducidas por la clase social del agricultor. Así, el 25% de los ganaderos dijeron que no usaban fertilizante

alguno para establecer los pastos; el 50% manifestó que usaban "lo del cultivo;" y los restantes aplicaban un fertilizante como úrea, 15-15-15-, o Escorias Thomas. Entre los agricultores de cultivos mixtos las proporciones fueron: el 47.4% dijeron que no usaban fertilizantes; el 26.3% que usaban "lo del cultivo," y el 26.3% restante aplicaban algún tipo de fertilizante (Hansen, 1983).

El uso futuro de la tierra depende en parte de la selección del pasto. Los ganaderos de la encuesta después de una cosecha de arroz habían sembrado los pastos yaragua (Melinis minutiflora), puntero (Hyperania ruffa), guinea (Panicum maximun) y kudzu (Fueraria phaseoloides), una leguminosa, y sólo uno sembró Brachiaria decumbens en un lote de suelo aluvial. Como el propósito fue sembrar potreros para engorde, la mayoría prefirieron las gramíneas más nutritivas en lugar del Brachiaria decumbens, el cual aunque resiste a la acidez y es de fácil expansión, es mucho menos nutritivo.

En contrapartida, hubo menos variedad de pastos escogidos por los agricultores de cultivos mixtos; casi la mitad de ellos (45%) sembraron únicamente Brachiaria decumbens en los lotes aluviales. Como es difícil destruir la Brachiaria decumbens excepto con la inundación, es probable que los suelos aluviales sembrados de Brachiaria no volverán a la producción de cultivos.

Según los usuarios del "patrón ganadero", los suelos sembrados en pastos después de una cosecha de arroz o maíz, no volverán a cultivos por unos 10-15 años. Por general, los agricultores de producción mixta sólo siembran sus lotes aluviales con pastos cuando están muy enmalezados.

Sin embargo, especialmente durante las cosechas malas o los períodos de precios bajos, los agricultores de empresas mixtas dicen que cambiarán la agricultura por la ganadería. Pero esto no es fácil para cualquier agricultor. Debido al alto costo del ganado, de la semilla y de las cercas, solamente los agricultores grandes pueden hacer la transición de la agricultura a la ganadería. Solamente el 19% de los agricultores de las encuestas fueron capaces de nombrar a otros quienes como resultado de las pérdidas en 1982 habían dedicado sus lotes de arroz en seco a la siembra de pasto y siempre se referían a agricultores que habían sembrado más de 100 ha. Los agricultores que habían sembrado menos de 100 ha y que habían perdido dinero en 1982 vendieron el ganado para pagar sus deudas o se volvieron "agricultores pequeños demasiado pobres para sembrar arroz" y alquilaron sus tierras o vendieron sus fincas. Otros continuaron cultivando intensivamente sin invertir, o con poca inversión, en el manejo del suelo.

### Discusión: Aspectos Sociales de la Transferencia de Tecnología de Fertilizantes

Aunque los datos de la investigación demuestran una relación clara entre la superficie sembrada, los patrones de manejo y la fertilización del suelo, entre los agricultores encuestados son las clases sociales las que explican estos patrones. La relación más significativa se encuentra en la interacción de la clase social del agricultor con el sistema de la ley 5a. usado como mecanismo para la transferencia de tecnología a los agricultores comerciales de arroz.

Para ser elegible para los créditos de FFAP, los agricultores deben incluir junto con su solicitud un contrato de asistencia técnica acordado con un agrónomo y el recibo de compra de la semilla certificada. El recibo de la semilla certificada asegura el uso de la tecnología incorporada en las nuevas variedades de arroz, y el contrato con el agrónomo asegura -- en teoría -- la supervisión de los otros aspectos técnicos del cultivo desde el uso de fertilizantes hasta las aplicaciones de pesticidas. Así las recomendaciones del agrónomo, de las cuales es responsable, afectan la manera como la Ley 5a. efectúa la transferencia de tecnología agrícola.

Los agrónomos deben ser graduados de una universidad y autorizados por el Instituto Colombiano Agropecuario, ICA. El ICA supervisa la labor de los agrónomos y además, es responsable de proveerles los cursos que los mantienen al tanto de las últimas tecnologías de producción. Durante el período 1982-1983 había un alto grado de desempleo y subempleo entre los agrónomos en el piedemonte del Meta. Fue difícil para un universitario graduado conseguir empleo a tiempo completo. Se necesitaban "conexiones" para conseguir un trabajo de campo con una de las compañías agroquímicas o suficientes hectáreas para trabajar (Hansen, 1983)

Debido a que los conocimientos y la experiencia del agrónomo es frecuentemente crítica para una cosecha exitosa de arroz, son vulnerables de ser tomados como "chivos expiatorios" por los fracasos. Todos los agricultores se quejan de que sus agrónomos no visitan regularmente sus cultivos, pero las quejas son más fuertes entre los agricultores que siembran menos de 100 hectáreas y que viven en el campo. Obviamente, los agricultores rurales sin vehículo dependen más de los agrónomos para sus consejos técnicos, que los que viven en la ciudad, asisten a conferencias sobre arroz, a presentaciones de los representantes de las agroindustrias, y a los días de campo en la Estación La Libertad del ICA.

Sin embargo, el pequeño agricultor no es el cliente preferido del agrónomo. Tales agricultores generalmente

viven en áreas remotas y el viaje de ida y vuelta al campo puede requerir más tiempo que lo justificado por la tarifa de asistencia técnica por hectárea. Los agrónomos buscan pues a los arroceros más grandes que viven en Villavicencio o Granada. Si se firma un contrato, ellos visitarán a tales arroceros por la tarde para discutir las visitas al campo, los insumos, y la cosecha. Si los dos se entienden bien hay posibilidad de hacer una sociedad en tierra alquilada para el año siguiente. Si el agrónomo no logra hacer un contrato con un agricultor con muchas hectáreas, entonces firmará contratos con productores menores quienes habrán sido recomendados por amigos o parientes en los bancos, o por centros de suministros agropecuarios. El agrónomo continuará con sus esfuerzos de mejorar su clientela en el siguiente semestre. Es esta la dinámica social que sostiene los patrones de transferencia de tecnología desde las fuentes a las distintas clases de agricultores.

Un interesante ejemplo específico que surgió de esta investigación, explica la distribución de las fuentes de fósforo "Compuestos" y "Alta Tecnología." entre los agricultores de distintas clases sociales. Hasta el año 1981, los científicos de suelos y los investigadores en arroz del ICA habían recomendado el uso de fuentes compuestas de P para arroz en secano. Los fertilizantes compuestos constituían la principal fuente de P producida en Colombia. En 1981 la Federación de Arroceros, que es el principal proveedor de insumos para la producción arrocera, recomendó el uso de DAP importado como fuente de fósforo. Al mismo tiempo el principal productor de fertilizantes de roca fosfórica en Colombia, comenzó a mercadear su producto en Villavicencio. En por lo menos un caso, esto incluyó, como experimento, la oferta de roca fosfórica gratis para un agricultor de influencia, quién sembraba más de 300 hectáreas de arroz. Adicionalmente, la compañía podía aprovechar la investigación agronómica y el estudio de suelos hecho por el Proyecto Fósforo IFDC/CIAT.

Las redes sociales informarles para la transmisión de información nueva, tanto comercial como científica, son casi exclusivamente urbanas, y solamente los agricultores urbanos y los agrónomos que trabajan con ellos son inmediatamente conscientes de las nuevas tecnologías en la medida en que estas entran al mercado. Los agricultores más distantes que contratan a los agrónomos con menos experiencia continúan comprando los compuestos producidos en Colombia.

Aunque este estudio indica una tendencia negativa de la transferencia de tecnología hacia los agricultores pequeños, paradójicamente en este ejemplo, esta tendencia no les hizo daño, ya que el DAP posiblemente no es la fuente de fósforo más apropiada para arroz en secano. Mucho más serio que

esto, es la gran proporción de agricultores en las categorías 1 y 2 que utiliza muy poco o nada de P en sus cultivos. Nuevamente, la práctica de fertilización, sin o con poco P, puede ser atribuida a la interacción de la Ley 5a. con la clase social del agricultor. Los agricultores que no utilizan fósforo disminuyen los costos de producción de un cultivo que esta retornando menos que lo que se gastó para producirlo. Dichos agricultores no tienen una línea de crédito para la compra de fertilizantes. Para sembrar arroz a crédito, los agricultores deben comprar la semilla certificada. Debido a que los agricultores necesitan tres o cuatro bultos, de semilla de 50 kilos cada uno, por hectáreas, los gastos en efectivo, aún para 20 ha, son considerables. Desde el momento de la compra de la semilla el pequeño agricultor, que está escaso de fondos, optará por proteger su inversión en semilla con herbicidas, fertilización con nitrógeno, y fumigaciones contra daños de insectos y hongos.

Además, la compra de la semilla se hace antes de la solicitud del crédito, y cuando este se aprueba, se concede en dos plazos. El primero se hace después de una visita de un oficial del banco para asegurarse de que se sembró el arroz, aproximadamente 15 días después de la germinación. Para el agricultor escaso de fondos el término de ambos -- la solicitud de crédito y el primer pago -- impiden la compra y la aplicación de fertilizante antes de la siembra y enfatiza la aplicación de los insumos requeridos después de la siembra.

Los agricultores grandes no sufren escasez de fondo tan severa; y pueden hacer las aplicaciones de fertilizantes pre-siembra. En los años inseguros pueden reducir el total de hectáreas sembradas y posponer su solicitud de crédito de tal forma que con los préstamos pagarán los costos de cosecha o asegurarse de donde vender su arroz y recibir el pago antes de que se cumpla el plazo del préstamo con sus altos intereses por mora. En algunos casos el préstamo puede servir para otras inversiones. Por ejemplo, un acomodado agricultor de cultivos mixtos solicitó un crédito para 80 hectáreas (reducido de 160 en 1982), con el fin de invertirlo a una tasa de interés mayor que el cobrado por el FFAP.

Suele observarse que la Ley 5a. es más protectora de los intereses de las empresas productoras de semillas que de los recursos naturales como la fertilidad del suelo. La Ley 5a. no exige un análisis del suelo ni un manejo específico de su fertilidad. Los análisis de suelos son recomendados, pero la mayoría de los agricultores no los usan anualmente, por el costo y por el término de la contratación del agrónomo. (Hansen 1983)

Por todo esto, los aspectos formales e informarles de la transferencia de tecnología arroceras en el piedemonte llanero muestran una tendencia en contra de los arroceros que viven en el campo y siembran menos de 100 ha. Cuando enfrentan una estrechez de la relación costo-precio los agricultores más grandes disminuyen la superficie o abandonan la producción, mientras que la tierra de los agricultores pequeños sigue bajo cultivo pero con pocas inversiones en el suelo.

### Las implicaciones para Futuras Investigaciones con Roca Fosfórica en Arroz en Suelos Aluviales en el Meta

Hay varias implicaciones de este trabajo para las futuras investigaciones con roca fosfórica en arroz sembrado en los suelos aluviales en el piedemonte llanero. Frimero, ya que se identificaron dos patrones básicos de manejo de tierra en la producción arroceras, las pruebas futuras a nivel de finca deberian reflejarlos. Así, para evaluar en esta región nuevas tecnologías de fertilizantes fosfóricos las pruebas a nivel de finca podrían incorporar dos diseños diferentes. Uno para el cultivo constante de arroz en suelos aluviales en rotación con sorgo o algodón; y otro para el uso de arroz en secano en rotación con pastos para potreros, (con excepción del Brachiaria decumbens).

También se podrían ampliar los esfuerzos de la investigación desde una orientación hacia un solo cultivo -- por ejemplo, arroz -- hacia un rango de opciones de cultivos y pastos (gramíneas) dentro de un específico sistema de cultivo ("farming system"). Esto podría contribuir a la producción y estabilidad económica del grupo de agricultores de cultivos mixtos, que son los agricultores que cultivan sus tierras más intensamente y la fertilizan menos y que normalmente reciben el menor beneficio de las nuevas tecnologías. Ellos no participan en las conferencias urbanas, financieras y técnicas disponibles para los agricultores grandes, inversionistas y ganaderos. Sus pocas hectáreas y su relativa escasez de fondos limitan su acceso al sistema de transferencia de tecnología de la Ley 5a.

Es probable que varios aspectos técnicos de la incorporación de los patrones de manejo de la tierra o de otros cultivos en los diseños experimentales para pruebas a nivel de finca conlleven a su vez a la búsqueda de maneras apropiadas y prácticas para la evaluación de tales experimentos. Sin embargo, sería un esfuerzo valioso porque una segunda implicación de este trabajo es que el destino de los mejores suelos del piedemonte llanero puede depender del destino del pequeño cultivador comercial de arroz. Por un lado, los suelos aluviales todavía controlados por tales arroceros corren el riesgo de degradación y por otro lado los

agricultores más acomodados compran estas tierras y las convierten en potreros sacándolas de la producción arrocerá.

En general, los patrones del uso de la tierra y fertilizantes de los productores de arroz de secano en el Meta contrastan en aspectos importantes con los de los agricultores de yuca y de frijol previamente estudiados por el proyecto Fósforo en el Valle del Cauca donde los productores de yuca más pequeños fueron los que más fertilizantes utilizaron debido a que no tenían tierra suficiente para dejarla descansar de la manera tradicional. Por el otro lado, hemos visto que muchos de los agricultores de arroz de secano en el Meta fertilizan menos porque los costos de producir este cultivo comercial, de uso relativamente extenso de la tierra, son altos. Esto, tanto como su posición fronteriza, sugiere que el agricultor de producción mixta que trabaja al margen de la agricultura comercial es un espesario agrícola especial que necesita una tecnología muy diferente a las desarrolladas para los campesinos y para los grandes agricultores comerciales.

Partiendo de un marco socio-histórico más amplio vale la pena señalar que el futuro de los suelos del Meta se relaciona con varios temas de la historia agraria colombiana. Tanto el papel de la colonización fronteriza como alternativa a la reforma agraria, como el papel de la baja fertilidad del suelo en el ciclo de incorporación de fincas colonizadoras a los establecimientos latifundistas y ganaderos han sido bien comentados. (March, 1982; Molano, 1981; CIAT, 1981; Hecht, 1982). Esta dinámica, junto con la búsqueda de terrenos baratos amenaza a los bosques tropicales al sur del Meta en la cuenca Amazónica. Con un enfoque sobre los sistemas de cultivos de los agricultores de producción mixta, las investigaciones sobre fertilizantes fosfóricos podrían contribuir a la estabilidad de los productores más constantes y no a la expansión del latifundio.

#### NOTAS:

1. Este trabajo se hizo como resultado de una beca post doctoral de la Fundación Rockefeller por la cual estoy agradecida. El trabajo no hubiera sido posible sin la colaboración y a veces la inspiración de los científicos de CIAT y del ICA como Luis Alfredo León, Jacqueline Ashby, Eric Owen y Luis Fernando Sánchez; de los agrónomos de Villavicencio y muy especialmente, de todos los arroceros de Granada, Villavicencio y Cumaral/Paratebuena con quién trabajé. Siento por todos ellos un profundo reconocimiento. Si hay errores de hecho o de interpretación son míos. También agradezco los comentarios de Rob Wasserstrom, Andrew

Maguire y Janet Brown de la World Resources Institute y la ayuda de Simón Guerrero y Grace Aguirre en la redacción del trabajo en Español.

2. Con el fin de evitar confusión, se enfatiza que las fincas pequeñas del Meta (con menos de 20 ha) no producen arroz. Son excluidas por los requerimientos de tierra de cultivo y sus altos costos de producción. La mayoría de las fincas pequeñas están agrupadas en el piedemonte de los Andes donde no se puede usar equipo y son en su mayoría utilizables en los sistemas de producción de carne y leche o sistemas de cultivos múltiples que incluyen maíz, café, cacao, plátano yuca y frutas (CECORA, 1981; ICA, 1982).

## APENDICE 1

Resumen del manejo representativo para un cultivo de arroz en secano en  
el piedemonte del Meta

Fecha de siembra:	Marzo 30 - Abril 3
Sitio seleccionado:	Lote de suelo aluvial mecanizado
Tamaño promedio del lote:	35 ha
Preparación:	Con la lluvia de febrero o después de la cosecha de sorgo en diciembre y enero se dan 3 ó 4 aradas, dos a tres semanas entre cada una y 5 a 7 pasos de discos.
Enmendaduras de suelo:	No
Variedades y semilla:	Metica-1, toda semilla certificada
Método de siembra:	Con tractor al voleo, 150 kg/ha
Insectos plagas:	A. <u>Scotodes oryzicola</u> , <u>Eutheola</u> sp. e <u>Hydrellia</u> sp.
Control de insectos:	<u>Productos y dosis:</u> Dependiendo del insecto, uno o mezclas de:  Furudan granulado 20-25 kg/ha Lorsban 0.5 - 1 lt/ha Metil Parathion 1 lt/ha Dipterex 1 lt/ha Toxafeno DDT40-20 1 gl/ha Basudin 1 lt/ha Dimetrón 1 lt/ha Sevin 80 1 lt/ha Sistem-Diostop 1 lt/ha

Metodo: Usualmente por avioneta; 50 días después de la germinación (DDG) se pueden usar fumigadoras de tractor.

Número de aplicaciones: Variable dependiendo de la intensidad de la plaga y las recomendaciones del agrónomo.

Epoca: Al inicio del cultivo puede ser semanalmente contra sogata y cucarrón. Las aplicaciones al final pueden ser mezcladas con fungicidas.

**Control de malezas:**

De acuerdo con el agricultor y las recomendaciones del agrónomo

Productos y dosis:

Propanil 500 2-2.5 gl/ha

Saturno Plus 8-10 lt/ha

Propanex 2-2.5 lt/ha

Stam M-4 2-2.5 lt/ha

Machete 4-4.5 lt/ha

Tordon 150-500 cc/ha

Prowl 5 lt/ha + Stam

Metodo: Avioneta o tractor.

No. de aplicaciones: 1 a 3 de acuerdo con el agricultor, el lote y las recomendaciones del agrónomo.

Epocas: Desde la germinación a 30 DDS, especialmente entre los 8 y 25 DDG.

Cuidado con la fitotoxicidad del herbicida Propanil (Propanex, Stam, Machete, etc) con los insecticidas fosforados (Furadán, Dipterex, Lortan, Metil Parathion). Esperar 8 días entre la aplicación de propanil y los productos fosforados.

## Fertilización

Nitrógeno y Potasio

Fuentes: Urea y KCl.

Cantidad: 125 kg de urea, 50 kg de KCl.

Epoas: En dos aplicaciones

i) 8 días después de la aplicación del herbicida (15-25 DDB).

ii) Al comenzar la formación de la espiga (50-75 DDB).

Método: A mano, al voleo con tractor o avioneta (50 DDB) dependiendo del agricultor.

Fósforo, análisis de suelo

1 1/2 bultos de 50 kg de DAP, postsiembra con la primera fertilización. 1 1/2 bultos de fertilizantes compuestos postsiembra con la primera fertilización.

## Control de enfermedades:

A. PiriculariaProductos y dosis:

Hinosan	1 lt/ha
Kasuan	1 1/2 lt/ha
Blas	1-2 lt/ha
Kitazin	1 1/2 lt/ha

Método: Avioneta excepto para variedades que son susceptibles antes de los 50 días de germinación cuando la fumigadora de tractor puede ser usada.

No. de aplicaciones: Dependen de la variedad, el agricultor y las recomendaciones del agrónomo.

a) C-8: 2 aplicaciones preventivas de rutina.

i) al 20% de macollamiento (80 DDB)

ii) al 80% algunos agricultores hicieron 8 aplicaciones)

b) Rhynchosporium oryzae

Productos y dosis:

Dithane M-45	5-6 lb/ha
Antracol	2 kg/ha
Duter	2 kg/ha
Benlate	0.3 kg/ha

Método: Avioneta con los productos para piricularia.

No. de aplicaciones: 2

Cosecha	105-125 DDB dependiendo de la variedad, agricultor, y disponibilidad de combinadas.
Rendimiento esperado	4-5 t/ha.

## REFERENCIAS

- CECORA. 1981. Diagnóstico de la explotación y el mercaderío de la leche en el Piedemonte Llanero. Centro de Cooperación de Reforma Agraria Ltda. Programa de Desarrollo Rural Integrado. DRI. Subprograma de comercialización. Villavicencio, Agosto.
- CIAT (Centro Internacional de Agricultura Tropical). 1981. CIAT in the 1980's. A long range plan for "El Centro Internacional de Agricultura Tropical."
- DANE. 1971. Censo Nacional Agropecuario. Boyacá y Meta, DANE, Bogota.
- Duff, E. 1968. Land Reform in Colombia, New York, Praeger Publishers.
- FEDEARROZ. 1981a. El cultivo del arroz en la zona de los Llanos Orientales. Mimeo, Villavicencio.
- FEDEARROZ. 1981b. El arroz en Colombia. Bogotá.
- Hansen, E. de G.R. 1983. Social Relations of Land and Fertility Use and Frontier Integration: Upland Rice in the Llanos Orientales of Colombia. Report to IFDC, December, Cali.
- Hansen, E. de G.R. 1984. Land Management and Phosphorus Fertilizer use among Upland Rice Farmers in Meta, Colombia. Executive Summary of Research. Report to IFDC, Spring, 1984, New York.
- Hansen, E. de G.R. 1986. Let Them Eat Rice. Maguire A., and J.W. Brown, editors, In: Brodering on Trouble; Resources and Politics in Latin America. World Resources Institute, Adler Publishers. Washington, D.C. pp. 101-151.
- Hecht, S.B., ed. 1982. Amazonía: Investigación sobre agricultura y uso de tierras. Memorias de la Conferencia Internacional, Abril, CIAT, Cali.
- ICA (Instituto Colombiano Agropecuario). 1982. Distrito Ariari No. 2. Informe semestral de producción agrícola, Semestre A-1982. Granada.
- ICA (Instituto Colombiano Agropecuario). 1982a. Area inscrita por cultivos hasta mayo 30 de 1982. Llanoticias. Boletín Informativo No. 09:1, ICA, Regional No. 8.
- ICA (Instituto Colombiano Agropecuario). 1982b. Regional 8, Llanos Orientales, Distrito de Transferencia de

- Tecnología No. 1. Villavicencio. Informe Anual de Actividades. Villavicencio, Marzo.
- ICA (Instituto Colombiano Agropecuario). 1983. Inscripción de cultivos. Semestre A de 1983. Llanoticias. Boletín Informativo No. 011, ICA. Regional No. 8, Villavicencio.
- IFDC/CIAT. 1981. Phosphorus Project. Annual Report, Cali, Colombia.
- IICA. 1980. Estudio del proceso de generación, difusión y adopción de tecnología en la producción de arroz en Colombia. Instituto Interamericano de Ciencias Agrícolas. Afisel, Ltda. Bogotá.
- de Janvry, A. 1981. The Agrarian Question and Reformism in Latin America. The Johns Hopkins University Press. Baltimore.
- León, L.A. 1981. Fertilización fosfórica del arroz. CIAT, Cali.
- Lourquin, P.P. 1967. Rice in Colombia: A Case Study in Agricultural Development. Food Research Institute Studies, 7(2):217-303.
- March, R. 1983. Development Strategies in Rural Colombia, New York: Frederick Praeger.
- Molano, A. 1981. De la violencia a la colonización: Itinerario social de una ilusión campesina, Ms. Versión Preliminar. Bogotá.
- Owen, E.J. y L.F. Sánchez. 1979. Uso y manejo de los suelos de la parte plana del departamento del Meta. ICA, Bogotá.
- Owen, E.J. y L.F. Sánchez, ed. Estado actual de los suelos arroceros. Mimeo, ICA, La Libertad.
- Perry, S. 1983. La crisis agraria en Colombia 1950-1980. Bogotá. El Ancora Editorial.
- Scobie, G. y R. Posada. 1977. The Impact of High-Yielding Rice Varieties in Latin America with Special Emphasis on Colombia. CIAT, Cali.
- Sin Clavijo, E. 1983. Producción de arroz en Colombia. Arroz, 32(227) Nov. - Dic: 9-36.
- U.S. Department of Agriculture. 1983. Foreign Agricultural Service. Attache Report, March 8. U.S. Embassy, Bogotá.

### Participantes

- Dr. Antonio Camacho, Geólogo, Subdirector de GEBOQL, Regional Cochabamba, Bolivia. (Vino en reemplazo del Dr. Victor Ricaldi).
- Dr. Raúl Rico, I.A., Vice-Rector, Universidad Mayor de San Simón, Cochabamba, Bolivia.
- Dr. Djalma Matinhao Gomes de Sousa - Investigador del Centro de Pesquisa Agropecuaria dos Cerrados - EMBRAPA, Planaltina, Brasil. (Vino en reemplazo del Dr. Wenceslao Goedert).
- Dr. Jaime Navas A., I.A., Jefe de la División de Disciplinas del ICA, Director del Programa Nacional de Suelos del ICA, Colombia.
- Ing. Luis Fernando Sánchez, I.A., Jefe de la Sección de Suelos de la Regional No. 8 del ICA, Villavicencio, Colombia.
- Dr. José Espinosa, I.A., Investigador Principal, Suelos, INIAP, Quito, Ecuador.
- Dr. Roberto Nuñez Escobar, I.A., Jefe de la Sección de Fertilidad de Suelos, Centro de Edafología, Colegio de Post graduados, Chapingo, Montecillos, México.
- Ing. Braulio La Torre Martinez, I.A., Director del Servicio Nacional de Laboratorios. Coordinador Técnico del Proyecto "Uso Agronómico de la Roca Fosfatada de Bayovar", INFA-E.F.A., La Molina, Lima, Perú.
- Dr. Eduardo Casanova, I.A., Coordinador de Investigaciones, Facultad de Agronomía, UCV, Maracay, Venezuela.
- Dr. Lawrence L. Hammond, I.A., Director de la División Agro-Económica del IFDC, Muscle Shoals, Alabama, USA.
- Dr. Julio Henao, I.A., Biometrista, División Agro-Económica, IFDC, Muscle Shoals, Alabama, USA.
- Dr. Adolfo Martínez, I.A., Economista Agrícola, División Outreach del IFDC, Muscle Shoals, Alabama, USA.
- Dr. Luis Alfredo León, Químico de Suelos, Coordinador Proyecto Fósforo IFDC/CIAT/IDRC, CIAT, Cali, Colombia.
- Ing. Luis G. Restrepo, I.A., Asistente de Investigación, Proyecto Fósforo IFDC/CIAT/IDRC, CIAT, Cali, Colombia.
- Sr. Carlos Alberto Penagos, Químico, Jefe del Laboratorio, Proyecto Fósforo IFDC/CIAT/IDRC, CIAT, Cali, Colombia.

Dra. Jacqueline A. Ashby, Socióloga, Coordinadora Proyecto Investigación Participativa, CIAT, Cali, Colombia.

Alfredo Alvarado, Proyecto IBIA/CHAPARE, Bolivia.

Rodrigo Ayala Valencia, CVC.

Nancy Barrera Marín, FAC-CS Agropecuarias, Palmira.

Jaime Ballesteros Monsalve, FOSFACOL, Colombia.

Alvaro Fetto, CVC.

Gustavo Adolfo Caicedo R., QUIMIVAL.

Manuel E. Camacho, AGROESTRATEGIAS Ltda.

Luis Ernesto Castillo P., ICA-CNI Palmira.

Juan J. Cordova, INIAP, Ecuador.

Fabio Duque Echeverry, FOSFACOL, Colombia, SA.

Emilio Delgado O., MAGNESIOS BOLIVALLE Ltda, Colombia.

Ember Gustavo Faran, FEDEARROZ.

Alvaro F. Galeano, SULCO S.A., Colombia.

Alvaro García O., ICA-CNI Palmira, Colombia.

Alberto Gómez, AGROST Ltda.

Jairo A. Gómez L., FAC-CS Agropecuarias, Palmira.

Adel E. González M., FAC-CS Agropecuarias, Palmira, Colombia.

Ricardo Guerrero R., MONOMEROS, Colombia.

Stella Hernández de C., FAC-CS Agropecuarias, Palmira.

Cesar Francisco Jiménez, FAAD.

Jaime Lentijo Jaramillo, FERTIAGRO.

Albert E. Ludwick, Potash and Phosphate Institute, E.U.

Libardo Méndez B., ICA, Colombia.

Germán Montaña V., ECOMINAS, Colombia.

Libardo Montealegre M., Fosfatos del Huila S.A., Colombia.

Mario Muñoz Aristizabal, FEDEARROZ.

Carlos J. Navarro U., FOSFACOL S.A., Colombia.

María Marvel Navia M., AGRUCO, Bolivia.

Vicente Novoa, INIAP - PROTECA, Ecuador.

Jorge Ortega E., ABOCOL, Colombia.

Alfonso Ortegón V., CVC.

Alvaro Peñaranda Pérez, FOSFONORTE S.A., Colombia.

Guillermo Redondo S., AGRICOLA DE ABONOS Ltda.

Tito Samuel Rodríguez D., Particular.

Miguel A. Rodríguez, Particular.

Norberto Salazar A., Magnesios Bolivalle Ltda.

Harold Tafur Hermann, FAC-CS Agropecuarias, Palmira.

Jorge Ilian Torres, ICA-FAC-CS Agropecuarias, Palmira.

Henry Vanegas Angarita, CIAT.

José Patricio Varvas Z., FEDEARROZ, Colombia.

Germain Vergara Guzmán, ABONAL.

Marina Sánchez de Prager, FAC-CS Agropecuarias, Palmira.

José C. Zapata S., Estudiante Agronomía, Palmira.

