

EFFECTO DEL TAMAÑO DE GRANOS EN LA EFICIENCIA
DEL SUPERFOSFATO CONCENTRADO EN TRES SUELOS
FIJADORES DE FOSFORO

Tesis de Grado de Magister Scientiae

Domingo A. Suárez Fernández



INSTITUTO INTERAMERICANO DE CIENCIAS AGRICOLAS DE LA OEA
Centro Tropical de Enseñanza e Investigación
Departamento de Cultivos y Suelos Tropicales
Turrialba, Costa Rica
Abril, 1971

EFEECTO DEL TAMAÑO DE GRANOS EN LA EFICIENCIA DEL SUPERFOSFATO
CONCENTRADO EN TRES SUELOS FIJADORES DE FOSFORO

Tesis


Presentada al Consejo de la Escuela para Graduados
como requisito parcial para optar al grado de

Magister Scientiae

en el


Instituto Interamericano de Ciencias Agrícolas de la OEA

APROBADA:



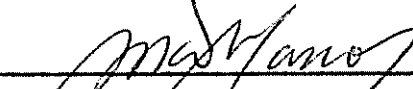
Kozen Igue, Ph.D.

Consejero



Rufo Bazán, Ph.D.

Comité



Mario Blasco, Ph.D.

Comité



Gilberto Páez, Ph.D.

Comité

Abril, 1971

A mis padres

A mi esposa

A mi hija

AGRADECIMIENTOS

El autor desea manifestar su agradecimiento a las siguientes personas e instituciones:

Al Dr. Kozen Igue, Consejero Principal.

A los Drs. Rufo Bazán, Mario Blasco y Gilberto Páez, miembros del Comité Consejero; asimismo al Dr. Hans. W. Fassbender, ex-Consejero Principal.

Al Ing. Raúl Fuentes, del Programa de Energía Nuclear (NEP) del IICA.

Al Instituto Interamericano de Ciencias Agrícolas de la OEA, al Programa de Energía Nuclear del IICA, al Programa Multinacional de la OEA y a la Escuela de Agronomía de la Universidad Católica de Chile (Santiago) por haber otorgado las becas, facilidades de uso de laboratorio e instrumental y licencia en comisión de estudios, respectivamente, que hicieron posible realizar los estudios de postgrado y desarrollar el presente trabajo de investigación.

A todos los profesores, personal auxiliar, colegas y amigos que en una u otra forma contribuyeron a la realización de este trabajo.

BIOGRAFIA

El autor nació en Nueva Imperial (Chile) el 11 de marzo de 1943.

Realizó sus estudios secundarios en el Colegio de La Salle, en Temuco, Chile.

Los estudios universitarios los realizó en la Escuela de Agronomía de la Universidad Católica de Chile, con especialización en Suelos, graduándose de Ingeniero Agrónomo en 1967.

Desde 1965 a 1967 se desempeñó como ayudante en los Departamentos de Fitotecnia y Suelos de la Escuela de Agronomía de la Universidad Católica de Chile y en 1967 recibió el cargo de Profesor Auxiliar en el Departamento de Suelos. Sus actividades profesionales han sido la docencia e investigación en la Fertilidad y Química de Suelos, principalmente.

En septiembre de 1969 ingresó a la Escuela para Graduados del Instituto Interamericano de Ciencias Agrícolas de la OEA en Turrialba, Costa Rica, habiendo obtenido el grado de Magister Scientiae en abril de 1971.

CONTENIDO

| | <u>Página</u> |
|--|---------------|
| LISTA DE CUADROS | viii |
| LISTA DE FIGURAS | ix |
| 1. INTRODUCCION | 1 |
| 2. REVISION DE LITERATURA | 3 |
| 2.1. Características de los suelos derivados de cenizas volcánicas | 3 |
| 2.1.1. Disponibilidad de fósforo | 3 |
| 2.1.2. Fijación de fósforo | 3 |
| 2.2. Factores que afectan la eficacia de los fertilizan- tes fosforados | 5 |
| 2.3. Efecto del tamaño de granos en la eficiencia de los fertilizantes fosforados | 10 |
| 2.4. El valor "A" | 14 |
| 3. MATERIALES Y METODOS | 17 |
| 3.1. Materiales | 17 |
| 3.1.1. Suelos utilizados | 17 |
| 3.1.2. Fertilizantes | 18 |
| 3.2. Método | 18 |
| 3.2.1. Diseño Experimental y Tratamientos | 19 |
| 3.2.2. Preparación del experimento | 19 |
| 3.2.3. Establecimiento del experimento | 20 |
| 3.2.4. Desarrollo del experimento | 20 |
| 3.2.5. Agregación de nutrimentos | 20 |
| 3.2.6. Cosecha y determinación de biomasa | 21 |
| 3.2.7. Segundo cultivo | 22 |
| 3.2.8. Análisis de laboratorio | 22 |
| 3.2.8.1. Análisis de la materia seca | 22 |
| 3.2.8.2. Análisis de los suelos | 24 |
| 3.2.9. Cálculo e interpretación estadística de los resul- tados | 24 |

| | <u>Página</u> |
|--|---------------|
| 4. RESULTADOS | 26 |
| 4.1. Características de los suelos | 26 |
| 4.1.1. Características químicas | 26 |
| 4.1.2. Características mineralógicas | 27 |
| 4.1.3. Densidad aparente y retención de humedad | 28 |
| 4.2. Resultados experimentales | 29 |
| 4.2.1. Efecto de los tratamientos en la producción de biomasa | 30 |
| 4.2.2. Efecto de los tratamientos en la absorción de P por las plantas de maíz | 32 |
| 4.2.3. Efecto de los tratamientos en la eficiencia del superfosfato concentrado | 42 |
| 4.2.4. Efecto de los tratamientos en el valor "A" | 52 |
| 5. DISCUSION | 56 |
| 6. CONCLUSIONES | 77 |
| 7. RESUMEN | 79 |
| 8. SUMMARY | 81 |
| 9. LITERATURA CITADA | 83 |
| APENDICE | 89 |

LISTA DE CUADROS

| Cuadro N ^o | | <u>Página</u> |
|-----------------------|---|---------------|
| 1 | Formas de P, contenido de óxidos libres de Fe y Al y capacidad de fijación de P en 14 suelos de Costa Rica. (Según Fassbender 10, 14) | 6 |
| 2 | Características químicas de los suelos estudiados (0-30 cm) | 26 |
| 3 | Composición mineralógica de la fracción arcilla (<2 μ) de los suelos estudiados (0-30 cm) | 27 |
| 4 | Densidad aparente en el campo y macetas de los suelos estudiados (0-30 cm), humedades gravimétricas respectivas y retención de humedad a 1/3 de bar | 28 |
| 5 | Efecto del tamaño de granos, dosis y cosechas en el valor "A" | 53 |

LISTA DE FIGURAS

| Figura Nº | | <u>Página</u> |
|-----------|---|---------------|
| 1 | Efecto del tamaño de granos, dosis y cosecha en la producción de biomasa en los suelos Colorado, Birrisito y Juray | 31 |
| 2 | Efecto del tamaño de granos, dosis y cosecha en la absorción de P por las plantas | 33 |
| 3 | Efecto de dosis y cosecha en la absorción de P del suelo | 35 |
| 4 | Efecto de tamaños de grano y dosis en la absorción de P del suelo | 36 |
| 5 | Efecto del tamaño de granos y dosis en la absorción de P del fertilizante en dos cosechas sucesivas | 38 |
| 6 | Efecto del tamaño de granos y dosis en la absorción total de P del fertilizante | 39 |
| 7 | Efecto del tamaño de granos y dosis en la distribución del P del fertilizante y suelo como % del P total absorbido | 41 |
| 8 | Efecto del tamaño de granos, dosis y cosecha en la eficiencia del superfosfato concentrado en el suelo Colorado | 43 |
| 9 | Efecto del tamaño de granos, dosis y cosecha en la eficiencia del superfosfato concentrado en el suelo Birrisito | 44 |
| 10 | Efecto del tamaño de granos, dosis y cosecha en la eficiencia del superfosfato concentrado en el suelo Juray | 45 |
| 11 | Efecto del tamaño de granos y dosis en la eficiencia final del superfosfato concentrado en los suelos Colorado, Birrisito y Juray | 47 |
| 12 | Efecto del tamaño de granos y dosis en los valores "A" finales | 55 |

1. INTRODUCCION

Los suelos ácidos se caracterizan, en general, por poseer una baja disponibilidad de fósforo para las plantas y una alta capacidad de "fijación" de este elemento lo que determina que solo un pequeño porcentaje (a veces menos del 1%) del fósforo aplicado al suelo sea aprovechado por las plantas.

En la literatura se encuentran numerosos estudios sobre la eficiencia de los fertilizantes fosforados. Un primer paso ha sido comparar la eficiencia relativa de distintos fertilizantes en el suministro de fósforo a un cultivo en un suelo determinado; otra etapa ha sido estudiar la eficiencia en función de la solubilidad y forma de aplicación. Dentro de este último aspecto, se ha encontrado que la granulación de los fertilizantes ha aumentado su eficiencia, especialmente cuando se trata de fórmulas de alta solubilidad y se aplican a suelos "fijadores" de fósforo.

Debido a las extraordinariamente altas capacidades de fijación que presentan los suelos volcánicos es en ellos donde más se justifica desarrollar estudios tendientes a seleccionar el tipo de fertilizante y la forma de aplicación más adecuada, mas aún si se considera el alto precio de los fertilizantes fosforados en los países latinoamericanos. Sin embargo, no hay antecedentes en la literatura revisada que indiquen se hayan realizado estudios de esta naturaleza.

El presente trabajo pretende ser una contribución inicial al estudio de la eficiencia de los fertilizantes fosforados en suelos "fijadores" de Costa Rica.

Los principales objetivos de esta investigación son:

1. Determinar la eficiencia del superfosfato concentrado en función de cinco tamaños de grano y tres dosis.
2. Determinar el efecto de estos tratamientos en
 - a) el crecimiento de las plantas;
 - b) la absorción de fósforo desde el fertilizante y el suelo por la planta; y
 - c) el comportamiento del valor "A".

2. REVISION DE LITERATURA

2.1. Características de los suelos derivados de cenizas volcánicas

Dos características parecen ser comunes a todos los suelos derivados de cenizas volcánicas u otros materiales volcánicos: a) un bajo contenido de fósforo disponible para las plantas (12, 16, 36, 38), y b) una alta capacidad de "fijar" el fósforo aplicado al suelo (2, 11, 13, 14).

2.1.1. Disponibilidad de fósforo

En un estudio sobre el estado nutricional de los principales suelos "latosoles" de Costa Rica mediante la técnica del elemento faltante, Martini (36) encontró que el fósforo fue siempre el principal nutrimento limitante del crecimiento de las plantas.

Fassbender, Müller y Balerdi (16) estudiaron el contenido y formas de fósforo en 110 suelos de América Central. Encontraron que el 66% de los suelos estudiados se mostraron extremadamente deficientes y que sólo un 15% presentó un nivel adecuado de disponibilidad de ese elemento.

2.1.2. Fijación de fósforo

La "fijación" del fósforo consiste en la transformación de los fosfatos de un fertilizante en formas menos solubles debido a reacciones que ocurren entre el fósforo liberado del fertilizante y el suelo. La causa de este fenómeno se atribuye a la presencia de cargas electropositivas originadas en la materia orgánica, arcillas e

hidróxidos del suelo; de este modo, los iones H_2PO_4^- producidos al solubilizarse el fertilizante son adsorbidos por el complejo coloidal. Por otra parte, debido a la presencia de iones Ca^{2+} , Fe^{3+} y Al^{3+} en la solución del suelo, se forman fosfatos simples con estos cationes, los que precipitan, o bien se forman fosfatos complejos de baja solubilidad (13). Todo esto determina que una escasa proporción del fósforo aplicado al suelo sea disponible para las plantas, quedando la mayor parte "fijado" en el suelo.

Bornemisza y Fassbender (2) estudiaron la absorción de fósforo por plantas de maíz en un experimento en invernadero. Trabajaron con suelos de Costa Rica (andosoles, latosoles y aluviales) y utilizaron como fertilizante el fosfato monocálcico marcado con ^{32}P . La enorme capacidad de fijación de estos suelos se manifestó en un bajo porcentaje de ^{32}P absorbido (menos del 1% del aplicado) y en que sólo un 0,91 a un 1,44% del fósforo total absorbido por las plantas provenía del fertilizante agregado.

En estudios de invernadero realizados con latosoles de Hawaii, DeDatta, Fox y Sherman (9), utilizando pirofosfato de sodio marcado con ^{32}P , encontraron que menos del 1% del fósforo agregado al suelo fue absorbido por la planta indicadora (Sorghum vulgare var. sudanense).

Fassbender (14) determinó la capacidad de fijación de fósforo en 107 suelos de América Central utilizando la técnica de Fassbender e Igue (15). La capacidad de fijación de fósforo varió entre un 9,7 y un 94,1%, siendo el pH y el por ciento de Fe_2O_3 los factores que más la afectaron.

En otro estudio de laboratorio, Fassbender (11) utilizó la isoterma de Langmuir para determinar la capacidad máxima de adsorción de P en tres suelos de Costa Rica; ésta siguió el orden: Colorado (Latosol) > Cervantes (Andosol) > El Banco (Aluvial). Al comparar los fosfatos adsorbidos con los precipitados concluyó que la precipitación es más importante que la adsorción en la retención de fosfatos en los suelos estudiados y en las condiciones experimentales existentes.

En base a datos de dos trabajos de Fassbender (10, 14), en el Cuadro 1 se indican las capacidades de fijación (% del P agregado), las fracciones de P-Al y P-Fe (% del P inorgánico total) y los porcentos de Fe_2O_3 y Al_2O_3 encontrados en 14 suelos de Costa Rica. Puede observarse una asociación entre el por ciento de Fe_2O_3 y el por ciento de P-Fe de los suelos pero no parece existir la misma relación entre el por ciento de Al_2O_3 y el por ciento de Al-P lo que podría interpretarse como que los óxidos de Al no juegan un papel importante en el fenómeno de fijación de P o como que la fracción P-Al no está bien determinada por el método de Chang y Jackson.

2.2. Factores que afectan la eficacia de los fertilizantes fosforados

Tradicionalmente se ha clasificado a los fertilizantes fosforados con base en un criterio de solubilidad y se ha asociado la disponibilidad de fósforo con su solubilidad en agua u otros solventes.

Cuadro 1. Formas de P, contenido de óxidos libres de Fe y Al y capacidad de fijación de P en 14 suelos de Costa Rica.
(Según Fassbender 10, 14).

| Series | P-Al % | P-Fe % | P-Ca % | % Al ₂ O ₃ libre | % Fe ₂ O ₃ libre | % óxidos libres | Fijación de P % |
|--------------------|-----------|-----------|-----------|--|--|-----------------------|--------------------|
| <u>Aluviales</u> | | | | | | | |
| El Banco | 19,92 | 26,08 | 36,21 | 3,80 | 3,03 | 6,83 | 26,2 |
| La Francia | 15,39 | 72,56 | 8,79 | 25,18 | 6,72 | 31,90 | -- |
| Instituto | 21,90 | 28,63 | 5,48 | 10,39 | 4,48 | 14,87 | 62,2 |
| Juray | 17,30 | 72,35 | 6,14 | 15,56 | 6,44 | 22,00 | 43,3 |
| La Lola | 6,75 | 21,36 | 20,61 | 3,80 | 3,50 | 7,30 | -- |
| La Margot | 20,60 | 64,69 | 9,27 | 12,11 | 5,46 | 17,57 | 43,0 |
| Reventazón | 9,35 | 21,44 | 7,41 | 11,13 | 4,55 | 15,68 | 34,1 |
| PROMEDIO | 15,89 | 43,87 | 13,42 | 11,71 | 4,88 | 16,69 | 41,8 |
| <u>Andosólicos</u> | | | | | | | |
| Aquiaries | 52,58 | 15,91 | 8,73 | 13,24 | 5,60 | 18,34 | 88,0 |
| Cervantes | 34,45 | 11,07 | 18,13 | 4,34 | 2,59 | 6,93 | 74,7 |
| Guayabo | 60,12 | 19,37 | 4,18 | 10,57 | 2,31 | 12,88 | 85,9 |
| Birrisito | 45,38 | 14,93 | 5,56 | 14,73 | 3,08 | 17,81 | 92,4 |
| Juan Viñas | 30,73 | 29,01 | 2,16 | 18,05 | 5,39 | 23,44 | 94,1 |
| PROMEDIO | 44,61 | 18,06 | 7,75 | 12,19 | 3,69 | 15,88 | 87,02 |
| <u>Latosólicos</u> | | | | | | | |
| Colorado | 21,06 | 31,20 | 3,24 | 19,24 | 4,97 | 24,21 | 66,5 |
| Paraiso | 14,03 | 57,83 | 8,63 | 14,96 | 6,09 | 21,05 | -- |
| PROMEDIO | 17,54 | 44,51 | 5,93 | 17,10 | 5,53 | 22,63 | 66,5 |

Sin embargo, debe tenerse presente que la disponibilidad del fósforo está influenciada, además, por factores inherentes al fertilizante, la planta y el suelo (41).

De acuerdo a Mattingly y Talibudeen (37), la disponibilidad de los fosfatos de calcio depende de su solubilidad y consecuentemente, de su composición química así como también del pH del suelo. Otros factores, especialmente propiedades de superficie y tamaño de granos, actúan indirectamente, modificando el ritmo de solubilización de los fosfatos.

Según Lawton y colaboradores (28, 29), la capacidad de un fertilizante para suministrar fósforo a un cultivo está determinada por cuatro factores: a) el tamaño de las partículas del fertilizante, b) su contenido de P soluble en agua, c) el método de aplicación del fertilizante y d) algunas propiedades del suelo como nivel de P disponible, textura y pH.

De lo expuesto puede extraerse que los dos principales factores que afectan la eficiencia de los fertilizantes fosforados son a) su ritmo de solubilización, b) las características del suelo que limitan el movimiento del fósforo disuelto desde el grano, como ser la "fijación" de P, y c) la planta.

Acerca de la importancia de este último factor hay evidencia en los resultados obtenidos por Bornemisza y Fassbender (2) quienes encontraron que las plantas de tomate fueron más eficientes que las de maíz y ambas más eficaces que Phaseolus calcata para absorber P del mismo fertilizante, aplicado en dosis similares y en los mismos

suelos. También Komani, Kurihara y Mitsui (26) han encontrado diferencias en la capacidad de extraer fósforo entre plantas de trigo y arroz.

La importancia del factor suelo ya ha sido en parte explicada en la sección anterior al señalar las capacidades de fijación determinadas en suelos de Costa Rica y las posibles causas de este fenómeno. Hsu (23) ha señalado que la fijación se debe principalmente a fenómenos de naturaleza química (precipitaciones) y que la adsorción física no debería considerarse como un proceso de fijación de alguna significación. Taylor, Gurney y Moreno (47) han encontrado que la mayor parte de los fosfatos precipitan como compuestos de aluminio; sin embargo, Lindsay y Stephenson (34) indican que el Fe es el catión más importante en el proceso de fijación de P.

De acuerdo a lo encontrado por Wada (56) y Urrutia (55), la presencia de alófana juega un papel especialmente importante en el proceso de fijación en suelos volcánicos.

Otros factores del suelo que afectan la eficiencia de los fertilizantes fosforados son aquellos que tienen relación con el movimiento de agua y solutos en el suelo. La importancia del factor agua tiene relación con el proceso de disolución de los fertilizantes en el suelo. Terman, Bouldin y Webb (51) señalan que cuando se coloca en el suelo un grano de fertilizante, su ritmo de disolución está controlado por la diferencia de presión de vapor entre la solución adyacente al grano y el agua del suelo. En el caso de sales relativamente solubles como el fosfato monocálcico, se forman soluciones

saturadas dentro de los granos lo que significa que la energía libre del agua es mucho menor en el grano que en el suelo que lo rodea; entonces el agua se mueve hacia el grano y en un tiempo relativamente corto (uno o varios días) los componentes solubles del fertilizante se han disuelto y movido hacia el suelo. Con fertilizantes menos solubles, como los fosfatos di y tricálcicos, también se forman estas soluciones saturadas dentro del grano pero son mucho menos concentradas, de manera que no se produce una gradiente de energía suficiente para inducir movimiento de agua y así estos compuestos pueden permanecer por meses y años en el suelo.

Lehr, Brown y Brown (32) encontraron que el proceso de disolución del fosfato monocálcico fue afectado por el tipo de suelo (textura), contenido de humedad, contenido de humus, actividad microbiónica, capilaridad y temperatura del suelo además del tiempo, y que el flujo capilar fue el principal mecanismo en el movimiento hacia el suelo de los fosfatos disueltos en el interior de los granos.

Gunary y colaboradores (20) indican que el movimiento de los iones fosfatos en el suelo es afectado, además de las gradientes de concentración y fenómenos de fijación, por la porosidad y el contenido de humedad del suelo. Olsen y colaboradores (39, 40) han determinado que el coeficiente de difusión del fósforo en solución varía de $0,4 \times 10^{-7}$ a $15,5 \times 10^{-7}$ y de $1,1 \times 10^{-7}$ a $6,7 \times 10^{-7}$ cm^2/seg cuando la succión del agua en el suelo disminuía de 6 a menos de 1 atmósfera y el contenido de arcilla aumentaba de 17 a 51%, respectivamente. Phillips, Place y Brown (43) encontraron una correlación positiva

entre las dosis de P aplicadas y los coeficientes de autodifusión del P en la solución del suelo.

De todo lo expuesto se puede concluir que todos los procesos que afecten el ritmo de disolución de un fertilizante y el posterior movimiento del fósforo en el suelo afectarán indirectamente la eficiencia del fertilizante. Como estos factores son muchos y actúan simultáneamente es complicado determinar, en un caso dado, cuáles son realmente los que están limitando la disolución del fertilizante y el subsiguiente movimiento del fósforo en el suelo.

2.3. Efecto del tamaño del grano en la eficiencia de los fertilizantes fosforados

Ya se ha indicado que el efecto de la granulación en la eficiencia de los fertilizantes fosforados es indirecto, a través de la regulación del ritmo de disolución.

Starostka, Caro y Hill (46) encontraron que el ritmo de disolución del fosfato monocálcico disminuyó 15 veces cuando el tamaño de las partículas aumentaba de 16-20 mesh a 4-5 mesh. Por otra parte, Terman, Bouldin y Webb (29), encontraron que la eficiencia de diferentes fosfatos insolubles en agua aumentó según disminuía el tamaño de granos.

Esta interacción entre el efecto del tamaño de granos y la solubilidad del fertilizante ha sido señalada por otros investigadores (22, 31, 37, 41, 45, 48, 49, 52, 57). También se ha observado que el tiempo de reacción disminuye la efectividad de los fertilizantes

granulados solubles en agua debido a "fijación" del P por el suelo (52). Asimismo, otros investigadores han observado que la interacción tamaño de partículas-solubilidad es más evidente cuando más ácido es el suelo (41). Además, se ha encontrado que el contenido de humedad del suelo afecta el ritmo de disolución de los gránulos (30).

De acuerdo a Terman y colaboradores (50, 51), además de los factores indicados se debe considerar el volumen de suelo influenciado por la disolución de fósforo del fertilizante. Debido a que la disolución depende del transporte de agua hacia el gránulo, le tomará más tiempo disolverse a un grano grande que a uno pequeño; como resultado de esto, el suelo inmediatamente adyacente a los granos grandes estará en contacto con una solución concentrada en fósforo por mayores períodos de tiempo que el suelo adyacente a gránulos pequeños. El resultado final es que más fósforo del fertilizante reaccionará con el suelo adyacente en los granos grandes que en los más pequeños. Esta relación entre las concentraciones relativas del P disuelto en función de la distancia al gránulo han sido observadas por Lewis y Racz (33) y las consideraciones conjuntas de los volúmenes de suelo afectado, las disponibilidades relativas de P por unidad de volumen, y el número de gránulos que intervienen en este proceso, ha permitido a Burns y colaboradores (7) desarrollar una fórmula matemática para la determinación de la disponibilidad de un fertilizante de un determinado tamaño de partículas. Esta ecuación es:

$$A = N \sum_{i=1}^n G_i V_i$$

donde:

- A = disponibilidad total del fertilizante
- G_i = índice de disponibilidad/unidad de volumen
- V_i = volumen de suelo afectado por G_i y
- N = número de partículas del fertilizante

Este mismo concepto de Burns ha sido descrito por Bouldin y Sample (5, 6,) como "solubilidad integrada" y aplicando este concepto en un experimento en que estudiaron la disponibilidad del fosfato dicálcico en relación al área específica de los granos (cm^2/g), explicaron el 85% de la variación en la absorción de P desde el fertilizante por plantas de avena.

Terman, DeMent y Clements (52), han encontrado que el efecto favorable de la granulación se refleja también en el efecto residual.

El efecto del encalado en la eficacia de los fertilizantes granulados ha sido estudiado por Peterburgskii y Debretseni (42), quienes encontraron que la absorción del P de dos fertilizantes solubles en agua, por plantas de avena, fue mayor cuando se aplicaron en formas granuladas que en polvo, tanto en suelos encalados (al total de la acidez hidrolítica) como sin encalar. Con fertilizantes insolubles en agua, la absorción de P fue también mayor desde una forma granular que en polvo en suelos sin encalar, pero en suelos encalados sucedió al revés.

Bouldin, DeMent y Sample (4) encontraron que cuando la proporción de fosfato monoamónico (100% soluble en agua) y fosfato dicálcico (insoluble en agua) en fertilizantes compuestos, era mayor de

1:1, la disponibilidad del fertilizante aumentaba según crecía el tamaño de las partículas y estos aumentos de la disponibilidad eran más notorios cuanto mayor era la proporción del fosfato monoamónico sobre el dicálcico; cuando la proporción fosfato monoamónico/fosfato dicálcico era inferior a 1:1 se producía un efecto inverso en la disponibilidad. Cuando la proporción de ambos fertilizantes era de 1:1 o muy cercano a ello, el tamaño de las partículas no tuvo efecto en la disponibilidad del P del fertilizante. Algo similar se desprende de los resultados obtenidos por Owens y colaboradores (41), quienes trabajaron con fertilizantes mixtos (N, P, K) y encontraron una falta de respuesta a la granulación cuando la fracción de P soluble en agua de los fertilizantes era entre 18 y 30%.

Williams y Lipsett (58) estudiaron la eficacia del superfosfato en función del tamaño de granos y la capacidad de fijación de distintos suelos. Encontraron que las partículas grandes fueron menos eficientes que las pequeñas cuando el fertilizante se aplicó a suelos con capacidades de fijación medias a bajas; cuando el superfosfato se aplicó a suelos de alta capacidad de fijación de fosfatos, las partículas más grandes fueron las más eficientes.

Lawton y Vomocil (30) encontraron que el ritmo de disolución del superfosfato concentrado aumentaba a medida que disminuía el tamaño de grano y también a medida que aumentaba el contenido de humedad en el suelo.

Un efecto similar al producido por el aumento del tamaño de las partículas puede producirse mediante el revestimiento. Savant,

Daftardar y Kibe (44) encontraron que el movimiento lateral de fósforo en granos revestidos fue solo la mitad al producido en granos sin revestir debido a la menor y más controlada difusión de fósforo en los primeros.

En base a lo expuesto en esta sección se puede concluir que la granulación aumenta la eficiencia de los fertilizantes cuya fracción de P soluble en agua es alta, y que este efecto es más notable si se aplican a suelos ácidos sin encalar y con alto contenido de humedad.

2.4. El valor "A"

En 1952, Fried y Dean (19) desarrollaron un nuevo concepto concerniente a la determinación de los nutrimentos disponibles en el suelo. Este concepto se basa en que si una planta obtiene un nutrimento desde dos fuentes distintas, la absorción de ese nutrimento es proporcional a las cantidades disponibles en ambas fuentes.

Si el nutrimento es el P y las dos fuentes de P son el P del suelo y el P aplicado como fertilizante, tenemos:

$$\frac{\text{P del fertilizante disponible en el suelo}}{\text{P disponible del suelo}} = \frac{\text{P del fertilizante en la planta}}{\text{P del suelo en la planta}}$$

De esto se deriva la fórmula para el cálculo del valor "A":

$$A = \text{P aplicado como fertilizante} \times \frac{\text{P del suelo en la planta}}{\text{P del fertilizante en la planta}}$$

Otra forma de expresarlo es:

$$A = \frac{R (1-y)}{y}$$

donde:

- A = cantidad de nutrimento disponible en el suelo
- R = cantidad de nutrimento aplicado con el fertilizante, e
- y = proporción entre el nutrimento del suelo/P del fertilizante en la planta indicadora.

Terman y Kasawneh (53) señalan que hay dos condiciones o principios inherentes en el uso de la ecuación de Fried y Dean:

a) la cantidad de nutrimento absorbido desde el suelo debe ser independiente de la cantidad del nutrimento aplicado como fertilizante, y

b) el por ciento de utilización (o % de recuperación) del nutrimento debe ser similar a cualquier dosis de aplicación de fertilizante.

Makled y Mowelchi (35) han encontrado que los valores "A" aumentan con la dosis de fertilizante y la edad de las plantas (tiempo de cosecha).

Spratt y Rennie (45) encontraron que los valores "A" aumentaron con la edad de las plantas, dosis de P, dosis de otros nutrimentos y contenido de humedad del suelo.

Terman y Kasawneh han estudiado el comportamiento del valor "A" con relación a las dosis de P aplicadas, la respuesta de las plantas a estas dosis y el nivel de P en el suelo. Concluyen que se presentan tres situaciones:

- a) Cuando el nivel de P en el suelo es bajo a medio y la respuesta de las plantas a las dosis son altas, el valor "A" aumenta con las dosis,
- b) Cuando el nivel de P en el suelo es alto a muy alto y no hay respuesta de las plantas a las dosis, el valor "A" permanece constante, y
- c) Cuando el nivel de P en el suelo es medio a alto y la respuesta a las dosis son pequeñas o no existen, el valor "A" puede mantenerse constante, aumentar e incluso disminuir con las dosis.

De lo expuesto se puede concluir que cualquier factor que afecte la absorción de P del suelo (como dosis de este u otros nutrimentos aplicados, humedad, etc.) y cualquier factor que afecte el porcentaje de recuperación del P del fertilizante (como tamaño de granos, tiempo de extracción, etc.) harán variar los valores "A".

3. MATERIALES Y METODOS

3.1. Materiales

3.1.1. Suelos utilizados

Se seleccionaron tres Series de suelos, representativas de los grupos de suelos de la Zona Oriental de la Meseta Central de Costa Rica (10):

- Serie Birrisito: "Andosol" limo-arcilloso con contenido medio de materia orgánica y buen drenaje (3), clasificado como Inceptisol, Andepts, Typic Dystrandeps (1). Obtenido en la finca "La Victoria", camino entre Turrialba y Juan Viñas; suelo ocupado con cultivo de caña de azúcar, a 1.200 m s.n.m., con una precipitación media anual de 3.800 mm y una temperatura media anual de 21°C.

- Serie Colorado: "Latosol" arcillo-arenoso con alto contenido de materia orgánica y buen drenaje (3), clasificado como Inceptisol, Tropepts, Typic Dystropepts (1). Obtenido en el Campo Gamma del CTEI; suelo bajo bosque natural a 700 m s.n.m., con una precipitación media anual de 2.500 mm y una temperatura media anual de 22,1°C.

- Serie Juray: "Aluvial" arcillo-arenoso, alto en materia orgánica, drenaje regular (3), clasificado como Inceptisol, Tropepts, Typic Dystropepts (1). Obtenido en la Sección Ganadería en los terrenos del CTEI (terrazza baja); suelo bajo pasturas a 600 m s.n.m., con una temperatura media anual de 22,1°C.

Cada uno de los suelos fue muestreado en el estrato superficial correspondiente a la capa arable (aproximadamente los primeros 30 cm).

3.1.2. Fertilizantes

Se usó el superfosfato concentrado o fosfato monocálcico monohidratado ($\text{Ca} (\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$) marcado con ^{32}P (0,436 mCi/g P_2O_5). Este fertilizante fue preparado por el TVA (Tennessee Valley Authority, USA) en cinco tamaños de grano: -12 mallas, 9-12 mallas, 6-9 mallas, 3-6 mallas y 0,5 pulgadas (aproximadamente 0,5; 2; 3; 6 y 12 mm de diámetro, respectivamente).

El superfosfato concentrado tenía un 51,6% de P_2O_5 .

3.2. Método

El método empleado consistió en una extracción biológica del fósforo "disponible" del fertilizante aplicado a los suelos. Para ello se desarrollaron tres ensayos con macetas (uno para cada suelo) en las que se hicieron crecer plantas de maíz en dos períodos sucesivos (dos cosechas). Como índice de la "disponibilidad" o "eficiencia" de los diferentes tamaños de grano empleados, se utilizó el "porcentaje de recuperación" $\left(\frac{\text{P}_2\text{O}_5 \text{ agregado}}{\text{P}_2\text{O}_5 \text{ extraído por las plantas}} \times 100 \right)$ determinado mediante análisis radiométrico del contenido de ^{32}P en el material vegetal cosechado.

3.2.1. Diseño Experimental y Tratamientos

Los ensayos consistieron en un factorial de 3 dosis de P x 5 ta₅ maños de grano lo que hace un total de 15 tratamientos. Se agregó un tratamiento testigo (sin P). Estos 16 tratamientos se repitieron cuatro veces lo que hizo un total de 64 parcelas (macetas) en cada ensayo. Los tratamientos fueron idénticos en los tres ensayos (uno para cada suelo) lo que hace un total de 192 macetas.

Las dosis de P aplicadas fueron:

- | | | | |
|----|--|---|------------------|
| 1) | 309,60 mg de P ₂ O ₅ /litro de suelo | = | 928,80 mg/maceta |
| 2) | 619,20 " " " | = | 1857,60 " |
| 3) | 928,80 " " " | = | 2786,40 " |

El ordenamiento de las parcelas (macetas) en el invernadero fue irrestrictamente al azar.

3.2.2. Preparación del experimento

Los suelos muestreados fueron secados al aire y tamizados por 5 milímetros. Posteriormente se colocaron 3 litros de suelo en macetas metálicas de aproximadamente 3,5 litros de capacidad. Los 3 litros se midieron con una maceta aforada y la masa de suelo que ocupa los tres litros se estandarizó pesando las macetas a medida que se iban llenando.

Una vez que todas las macetas estuvieron ocupadas con los 3 litros de suelo e identificadas de acuerdo a los tratamientos que les correspondiera, se vació el suelo contenido en ellas a bolsas de polietileno donde se les agregó el superfosfato concentrado y se mezcló

con todo el suelo; una vez que el fertilizante y el suelo estaban bien mezclados se vació el contenido de las bolsas a las macetas que quedaron así listas para la siembra.

3.2.3. Establecimiento del experimento

Se sembraron 12 semillas de maíz distribuidas en forma equidistante. La variedad empleada fue el híbrido precoz (90 días) H-T-23. La siembra se realizó el 24 de septiembre de 1970.

3.2.4. Desarrollo del experimento

Cuatro días después de la siembra comenzó la emergencia de las plantas y seis días más tarde se hizo un raleo dejando sólo seis plantas por maceta. Se eliminaron aquellas plantas más atrasadas en desarrollo, dejando las más vigorosas y uniformes.

Fue necesario efectuar riegos desde los primeros días del crecimiento de las plantas. El riego se realizó por capilaridad aplicando el agua en las bandejas sobre las cuales iban colocadas las macetas; el agua entraba al suelo por los orificios de drenaje de las macetas y ascendía por capilaridad.

3.2.5. Agregación de nutrimentos

Al comienzo del desarrollo de las plantas se hizo una adición de todos los nutrimentos esenciales excepto el fósforo. El criterio seguido en las dosis fue con base en las normas prescritas por Mitscherlich de acuerdo a lo indicado por Hardy y Bazán (21). Como la técnica de Mitscherlich está desarrollada para macetas con 6 Kg

de suelo se aplicaron la mitad de las dosis prescritas. Las fuentes y dosis para los diferentes nutrimentos fueron las siguientes:

- Nitrógeno : 1,5 g de NH_4NO_3 /maceta
- Potasio : 1,2 g de KCl /maceta
- Magnesio : 0,5 g de $\text{MgSO}_4 \times 7 \text{H}_2\text{O}$ /maceta
- Calcio : 1,0 g de $\text{CaSO}_4 \times 7 \text{H}_2\text{O}$ /maceta
- Hierro : 0,1 g de $\text{FeC}_6\text{H}_5\text{O}_7 \times 5\text{H}_2\text{O}$ /maceta
- Manganeso : 0,075 g de $\text{MnSO}_4 \times \text{H}_2\text{O}$ /maceta
- Zinc : 0,038 g de $\text{Zn SO}_4 \times \text{H}_2\text{O}$ /maceta
- Cobre : 0,0075 g de $\text{Cu SO}_4 \times \text{H}_2\text{O}$ /maceta
- Molibdeno : 0,0075 g de $\text{Na}_2\text{MoO}_4 \times 2 \text{H}_2\text{O}$ /maceta
- Boro : 0,0075 g de $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \times 10 \text{H}_2\text{O}$ /maceta

Todos estos nutrimentos se agregaron en solución mediante riegos, a excepción del sulfato de calcio que se agregó en polvo y fue mezclado con el suelo en el momento de agregar el superfosfato.

Se realizó una segunda aplicación de nutrimentos equivalente a la mitad de la primera, 28 días después de la siembra con el objeto de corregir posibles deficiencias.

3.2.6. Cosecha y determinación de biomasa

La cosecha se realizó 38 días después de la siembra, el 2 de noviembre de 1970. En cada maceta se cortaron los tallos de las plantas a 1 cm sobre el nivel del suelo, se guardaron en una bolsa de papel y llevaron a una estufa de aire forzado donde permanecieron 48 horas a 75°C. Después, las plantas fueron pesadas para determinar

su peso seco y molidas en un molino Wiley con tamiz de 0,5 mm. La materia seca molida se guardó en frascos de vidrio con tapa hermética para que no adsorbieran humedad y así fueron conservadas hasta el momento de ser analizadas.

3.2.7. Segundo cultivo

Después de la primera cosecha se extrajeron los restos de tallos que quedaron en las macetas así como también las raíces superficiales para preparar una "cama de semilla" adecuada a la segunda siembra. Esta se realizó en forma similar a la primera, el 12 de noviembre de 1970. La germinación ocurrió el 17 de noviembre y el raleo se efectuó el 21 del mismo mes. El desarrollo del experimento fue similar al primer cultivo, lo mismo la agregación de nutrimentos salvo que en esta segunda oportunidad no se agregó calcio.

La segunda cosecha se realizó el 30 de diciembre y el tratamiento posterior fue idéntico al de la primera.

3.2.8. Análisis de laboratorio

3.2.8.1. Análisis de la materia seca

En las 384 muestras de materia vegetal se hicieron determinaciones del P total y ^{32}P . Para ello se pesaron 2 gramos de cada muestra y se les realizó una digestión empleando mezcla nitroperclórica (20 cc de HNO_3 + HClO_4 5:1). El extracto digerido se llevó a volumen (50 cc en el caso de las muestras de la primera cosecha y 25 cc en la segunda para tener suficiente actividad para las mediciones radiométricas).

Las concentraciones de ^{32}P en el tejido vegetal se determinaron tomando una alícuota de 1.000λ (1 cc) del extracto digerido (y llevado a volumen) las que se colocaron en cada caso, en planchetas de acero. Luego se procedió a evaporar las muestras líquidas mediante radiación infrarroja. Las planchetas con las muestras disecadas se colocaron en portaplanchetas y se midió su actividad específica (c.p.m./g de muestra) usando un equipo "Nuclear Chicago" compuesto de un escalímetro (Modelo 161-A), un pasador-cambiador automático de muestras (Modelo C-110 B) provisto de tubo Geiger Muller y un registrador de tiempo (Modelo C-111 B). Las muestras se midieron según el orden de los tratamientos y para cada 4 muestras (repeticiones de un tamaño de grano) se midió el patrón correspondiente (c.p.m./mg de P_2O_5).

Se prepararon 5 patrones (uno para cada tamaño de partículas) disolviendo 1 g de fertilizante con HCl y llevando a un volumen final de 100 ml. Esta solución se diluyó 1:5 y se prepararon planchetas de 1.000λ de la solución final. La concentración de ^{32}P se calculó dividiendo las actividades específicas de las muestras (c.p.m./g de muestra) por las actividades específicas de los patrones (c.p.m./mg de P_2O_5) lo que da directamente los mg de $^{32}\text{P}_2\text{O}_5/\text{g}$ de muestra. La extracción total de $^{32}\text{P}_2\text{O}_5/\text{maceta}$ se obtuvo multiplicando las concentraciones por el peso seco obtenido en cada maceta.

Las concentraciones de P_2O_5 total en el tejido vegetal ($\text{P}_2\text{O}_5 + ^{32}\text{P}_2\text{O}_5$) se hizo a partir de alícuotas del mismo extracto digerido mediante colorimetría; se usó un fotocolorímetro marca Coleman Junior.

3.2.8.2. Análisis de los suelos

En los tres suelos estudiados se realizaron las siguientes determinaciones:

- a) Densidad aparente en el campo (método del cilindro) y de los suelos en las macetas (directamente, mediante la masa y volumen conocidos).
- b) Fraccionamiento de los fosfatos inorgánicos. Método de Jackson (25).
- c) Sesquióxidos de Fe y Al por el método de Bornemisza e Igue (3).
- d) pH, en suspensión acuosa 1:2,5 y
- e) Análisis mineralógico, mediante análisis térmico diferencial y la prueba de Fields y Perrots de detección rápida de alófana (17).

Todos los análisis radioquímicos se hicieron en las instalaciones del NEP-IIICA (Nuclear Energy Program) y las determinaciones químicas en el laboratorio de suelos del NEP y el Laboratorio de Suelos del Departamento de Cultivos y Suelos Tropicales.

3.2.9. Cálculo e interpretación estadística de los resultados

Se determinaron las siguientes variables de respuesta:

- materia seca (mediante pesaje)
- extracción de P total (mediante análisis colorimétrico)
- extracción del P del fertilizante (mediante análisis radiométrico)

- extracción del P del suelo (por diferencia entre los dos anteriores)
- % del P total derivado del fertilizante
- valores "A" ($A = R \left(\frac{1-y}{y} \right)$ ver revisión de literatura)
- eficiencia: como índice de la "eficiencia" de los fertilizantes se usó el "% de recuperación" = $\left(\frac{^{32}\text{P aplicado}}{^{32}\text{P extraído}} \right) \times 100$.

Para las variables de respuesta se realizaron análisis de varianza de acuerdo al factorial: 2 cosechas (C) x 3 Dosis (D) x 5 Tamaños de grano (Tg) calculándose la significancia de los efectos principales (C, D y Tg) y las de sus interacciones (C x D; C x Tg; D x Tg y C x D x Tg).

Para la variable "eficiencia" se realizó además un análisis de regresión en base a las variables independientes $X_1 = \text{dosis } (X_{11} - X_{12})$ y $X_2 = \text{tamaño de grano } (X_{21} - X_{23})$. Se usó el modelo cuadrático $y = \hat{b}_0 + \hat{b}_1 x_1 + \hat{b}_2 x_2 + \hat{b}_{11} x_1^2 + \hat{b}_{22} x_2^2 + \hat{b}_{12} x_1 x_2$ y se interpretó por superficie de respuesta determinando las isocuantas, lo que permite obtener la optimización de "y".

Los análisis estadísticos se realizaron por computación electrónica (Centro de Biometría, IICA-CTEI).

4. RESULTADOS

4.1. Características de los suelos

4.1.1. Características químicas

En el Cuadro 2 se indican los resultados de los análisis químicos de los suelos Colorado, Birrisito y Juray.

Cuadro 2. Características químicas de los suelos estudiados (0-30 cm).

| Suelo | pH | Oxidos libres (%) | | | Fraccionamiento de P ($\mu\text{gP/cc}$) | | | | |
|-----------|-----|-------------------|-----|-------|--|------|------|------|------|
| | | Al | Fe | Total | P-sol | P-Al | P-Fe | P-Ca | Suma |
| Colorado | 5,2 | 31,0 | 6,3 | 37,3 | tr | 62 | 344 | 27 | 433 |
| Birrisito | 5,7 | 26,8 | 2,3 | 29,1 | tr | 143 | 64 | 35 | 242 |
| Juray | 6,2 | 12,6 | 2,9 | 15,5 | tr | 667 | 339 | 118 | 1124 |

tr = trazas

Al comparar los resultados obtenidos en los distintos suelos puede observarse que los fosfatos de Fe varían de acuerdo con el contenido de óxidos de Fe, sin embargo, no ocurre lo mismo con los fosfatos de Al que presentan el valor más bajo en el suelo Colorado que es, al mismo tiempo, el que contiene el mayor por ciento de óxidos de Al.

No parece existir tampoco una relación entre el por ciento de

óxidos totales y el total de las fracciones del P inorgánico; el suelo Juray presentó el menor por ciento de óxidos libres y sin embargo muestra el mayor contenido de fosfatos inorgánicos, lo que podría interpretarse como que el suelo Juray tendría saturada, en mayor proporción que el resto, su "capacidad de fijación" debida al Fe y Al.

4.1.2. Características mineralógicas

En el Cuadro 3 se indican los resultados del análisis mineralógico de la fracción arcilla (< 2 μ) realizados en los suelos estudiados.

Cuadro 3. Composición mineralógica de la fracción arcilla (< 2 μ) de los suelos estudiados* (0-30 cm).

| Suelos | Alófana** | Metahaloesita | Gibbsita | Goethita/ Hematita | Geles ferricos |
|-----------|-----------|---------------|----------|-----------------------|-------------------|
| Colorado | + | ++++ | ++ | ++ | ++ |
| Birrisito | ++++ | - | +++ | - | + |
| Juray | ++++ | - | ? | - | - |

++++ = dominante; +++ = común; ++ = presente; + = escaso; - = ausente

* Besoain, M., E. Datos no publicados

** Determinación de Alófana según el método de Fieldes y Perrot (17)

Puede observarse que en los suelos Birrisito y Juray domina la Alófana (mineral amorfo), en cambio en el suelo Colorado domina la Metahalosisita (mineral cristalino). Además, en el suelo Colorado se encontró presencia de Goethita/Hematita y Geles férricos quienes estuvieron ausentes o se presentaron en cantidad escasa en los suelos Birrisito y Juray.

4.1.3. Densidad aparente y retención de humedad

En el Cuadro 4 se indican los resultados de las determinaciones de densidad aparente de los suelos en el campo y en condiciones de invernadero (macetas) y sus respectivas humedades gravimétricas; se indican además las humedades gravimétricas correspondientes a una tensión de 1/3 de bar (capacidad de campo).

Cuadro 4. Densidad aparente en el campo y macetas de los suelos estudiados, (0-30 cm) humedades gravimétricas respectivas y retención de humedad a 1/3 de bar.

| Suelos | Dap campo | θ_g % campo | Dap macetas | θ_g % macetas | θ_g a 1/3 de bar (%) |
|-----------|-----------|--------------------|-------------|----------------------|-----------------------------|
| Colorado | 0,90 | 35,6 | 1,00 | 13,6 | 35,6 |
| Birrisito | 0,55 | 102,0 | 0,51 | 50,4 | 74,9 |
| Juray | 0,83 | 64,5 | 0,62 | 45,2 | 69,7 |

Se observa que a excepción del suelo Birrisito, se produjeron diferencias apreciables entre las densidades aparentes de campo y

macetas debido a las alteraciones del tamizaje del suelo y la compactación artificial producida al colocar los suelos en las macetas; esto último parece ser lo que más influyó para las variaciones del suelo Colorado y en el caso del suelo Juray es necesario indicar que este suelo presentó gravas de 0,5 a 1 cm en su estrato superficial las que desaparecieron por acción del tamizaje y consecuentemente produjo la anotada disminución de su densidad aparente.

Se observa también que los contenidos de humedad a $1/3$ de bar fueron superiores en los suelos Birrisito y Juray lo que determinó que la frecuencia de riegos de las macetas con suelo Colorado fuera mayor que en los otros.

Otras características de los suelos estudiados (% de C orgánico y textura) se indican en el Cuadro 1 del Apéndice con base en datos encontrados por Fassbender (10).

4.2. Resultados experimentales

En el Cuadro 2 del Apéndice se indican los resultados encontrados para las siete variables de respuesta estudiadas. Se presentan los resultados individuales correspondientes a cada una de las dos cosechas realizadas, como también los resultados finales producto de las dos cosechas analizadas en conjunto. Las cifras que se presentan corresponden a medias de cuatro repeticiones.

Los resultados de los Análisis de Variancia realizados para cada una de las variables de respuesta en las tres observaciones (primera, segunda cosecha y total), se indican en el Cuadro 3 del Apéndice.

Con el objeto de simplificar la presentación de los resultados experimentales estos se mostrarán en forma de figuras que indiquen las tendencias más importantes encontradas y que posteriormente serán objeto o harán aporte a la discusión.

4.2.1. Efecto de los tratamientos en la producción de biomasa

En la Figura 1 se indican los efectos del tamaño de granos, dosis y cosecha en la producción de materia seca de las plantas de maíz. Los tres factores señalados produjeron variaciones significativas en la biomasa, la que aumentó con las dosis y en general fue inferior en la segunda cosecha, en todos los suelos. La biomasa tuvo también incrementos decrecientes en función del aumento del diámetro de las partículas del fertilizante, alcanzándose un máximo con un tamaño dado, distinto según el suelo, la dosis y cosecha que se trate.

Las respuestas de las plantas fueron similares en los suelos Colorado y Birrisito; el suelo Juray provocó una producción media de biomasa superior a los anteriores y también, al contrario de ellos no mostró claramente una respuesta de las plantas al tamaño de las partículas.

Puede observarse además algunos efectos significativos de los factores principales combinados en la producción de materia seca como ser tamaños de grano x cosecha, en los tres suelos; dosis x tamaño de grano y dosis x tamaños de grano x cosecha, en el suelo Colorado. Como estas interacciones aparecen, e incluso más claramente, en la absorción del P del fertilizante por las plantas de maíz, serán

Dosis 1 = 309,6 mg P₂O₅/l suelo
 Dosis 2 = 609,2 mg P₂O₅/l suelo
 Dosis 3 = 928,8 mg P₂O₅/l suelo

■ 1a. cosecha
 □ 2a. cosecha

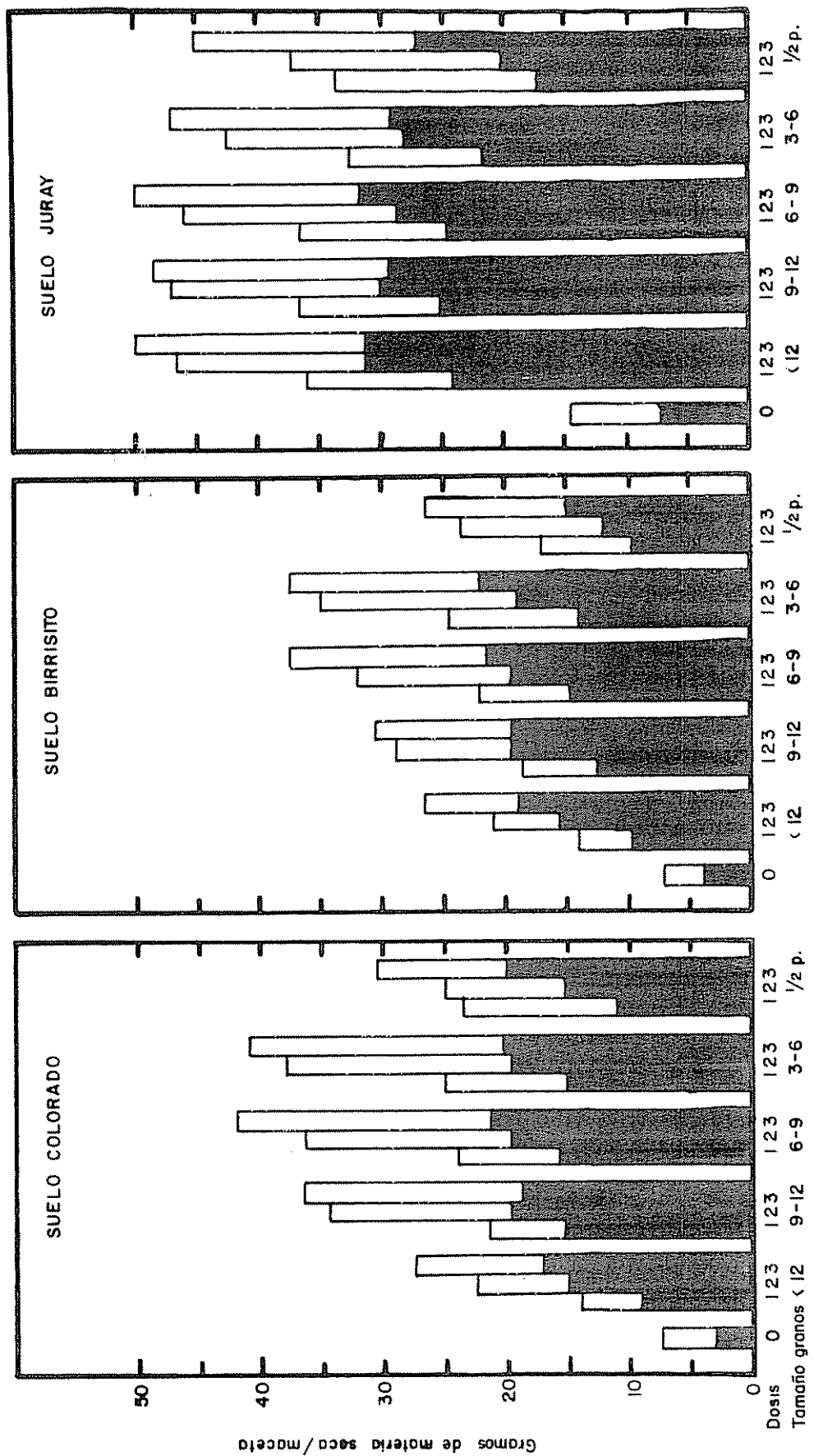


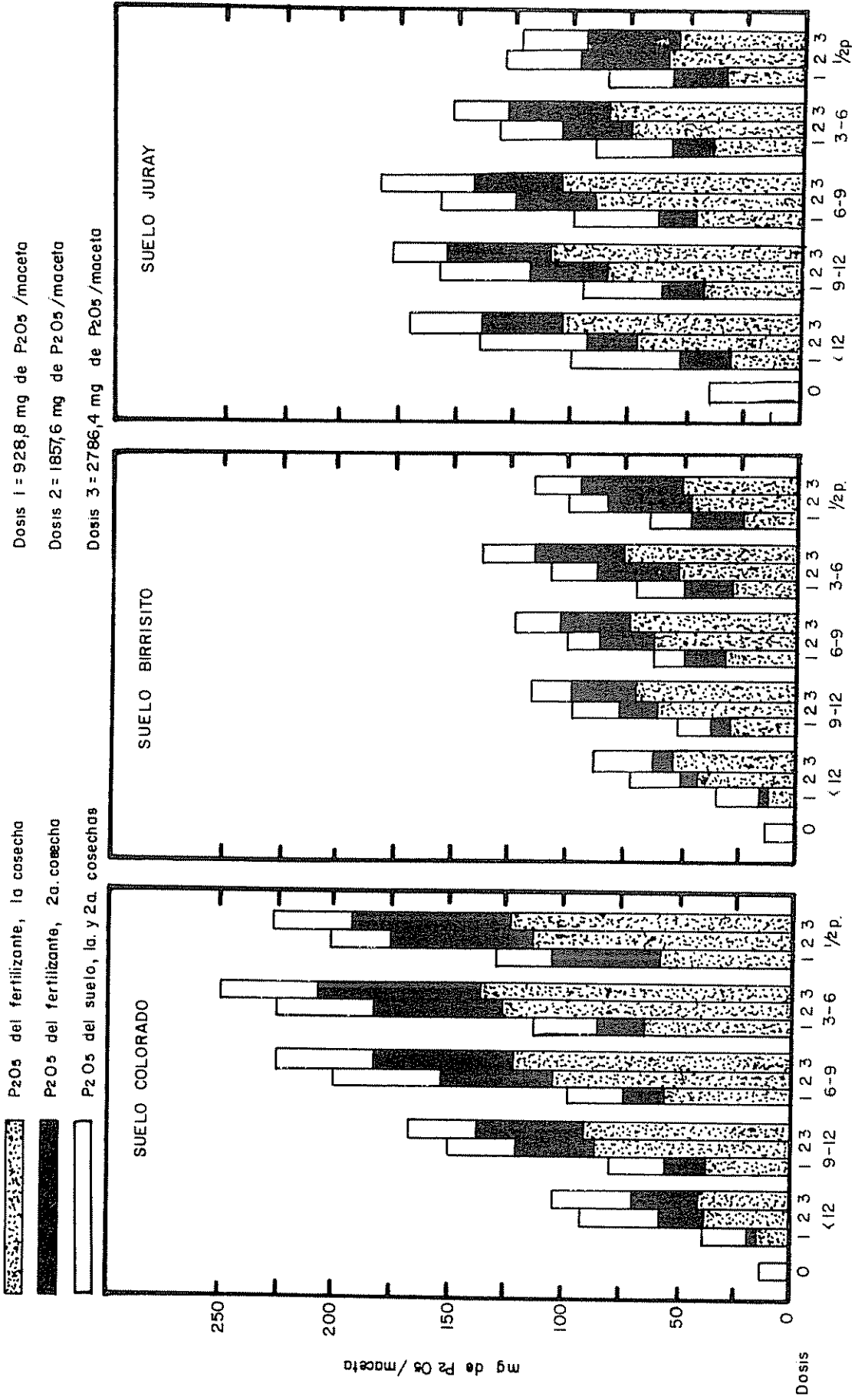
Fig. 1 Efecto del tamaño de granos, dosis y cosecha en la producción de biomasa en los suelos Colorado, Birrisito y Juray

descritas al analizar dicha variable de respuesta ya que ella es consecuencia, en parte, de la biomasa y es la que determina la "eficiencia" del fertilizante, cuyo estudio constituye el objetivo principal del presente trabajo.

4.2.2. Efecto de los tratamientos en la absorción de P por las plantas de maíz

En la Figura 2 se indican los efectos del tamaño de granos, dosis y cosecha en la absorción de P por las plantas de maíz, en los suelos Colorado, Birrisito y Juray.

Se observa que las dosis aumentaron la extracción de P total en todos los suelos. El aumento del diámetro de las partículas del fertilizante produjo también incrementos decrecientes en la extracción de P total, produciéndose un máximo con un tamaño dado. Sin embargo los suelos difirieron en la absorción de P total por las plantas; así en el suelo Colorado las plantas extrajeron mayores cantidades de P total que en el suelo Juray, y en éste a la vez más que en el Birrisito. Además, aunque tanto en el suelo Colorado como en el Bi-rrisito se produjeron incrementos decrecientes en la absorción de P total en función del aumento del diámetro de los gránulos, produciéndose un máximo con las partículas de 3-6 mallas, se observa que los incrementos fueron mayores y más constantes en el caso del suelo Colorado. En el suelo Juray, al contrario de los anteriores, las extracciones mayores de P total se produjeron con gránulos pequeños y sólo se observan incrementos muy leves con el aumento del tamaño de granos hasta 6-9 mallas.



Tamaños de grano en mallos/pulgada²

Fig.2 Efecto del tamaño de granos, dosis y cosecha en la absorción de P por las plantas

Otra observación que es importante resaltar es que las variaciones producidas por los tratamientos en la extracción del P total están determinadas, fundamentalmente, por el P del fertilizante ya que el P del suelo, aunque varió significativamente a causa de los tratamientos, tuvo variaciones menores que las correspondientes al P del fertilizante. Esta es la razón por la que las tendencias del P total sean similares a las observadas para el P del fertilizante, lo que se manifiesta, además, con la concordancia entre los valores de "F" calculados (para las diferentes fuentes de variación como sus interacciones) y su significancia estadística, entre el P total y el P del fertilizante, en el Cuadro 2 del Apéndice.

En las Figuras 3 y 4 se indica el efecto de los tratamientos en la extracción de P del suelo. En la Figura 3 se observa que en los suelos Birrisito y Colorado las dosis aumentaron la extracción del P del suelo por las plantas, aunque en el último suelo sólo hubo aumento hasta la dosis de 1857,6 mg de P_2O_5 /maceta; en el suelo Juray la extracción de P del suelo disminuyó con las dosis. En relación al efecto de las cosechas, la extracción de P del suelo se mantuvo constante en los suelos Birrisito y Juray y fue significativamente menor en la segunda cosecha en el suelo Colorado.

En la Figura 4 se indica el efecto de los tamaños de grano y dosis en la extracción de P del suelo. Se observa que las tendencias aparecen más definidas con las dosis más bajas y que el suelo Juray mostró una tendencia a disminuir la extracción de P del suelo según aumentaba el tamaño de granos, en cambio en el Birrisito fue al

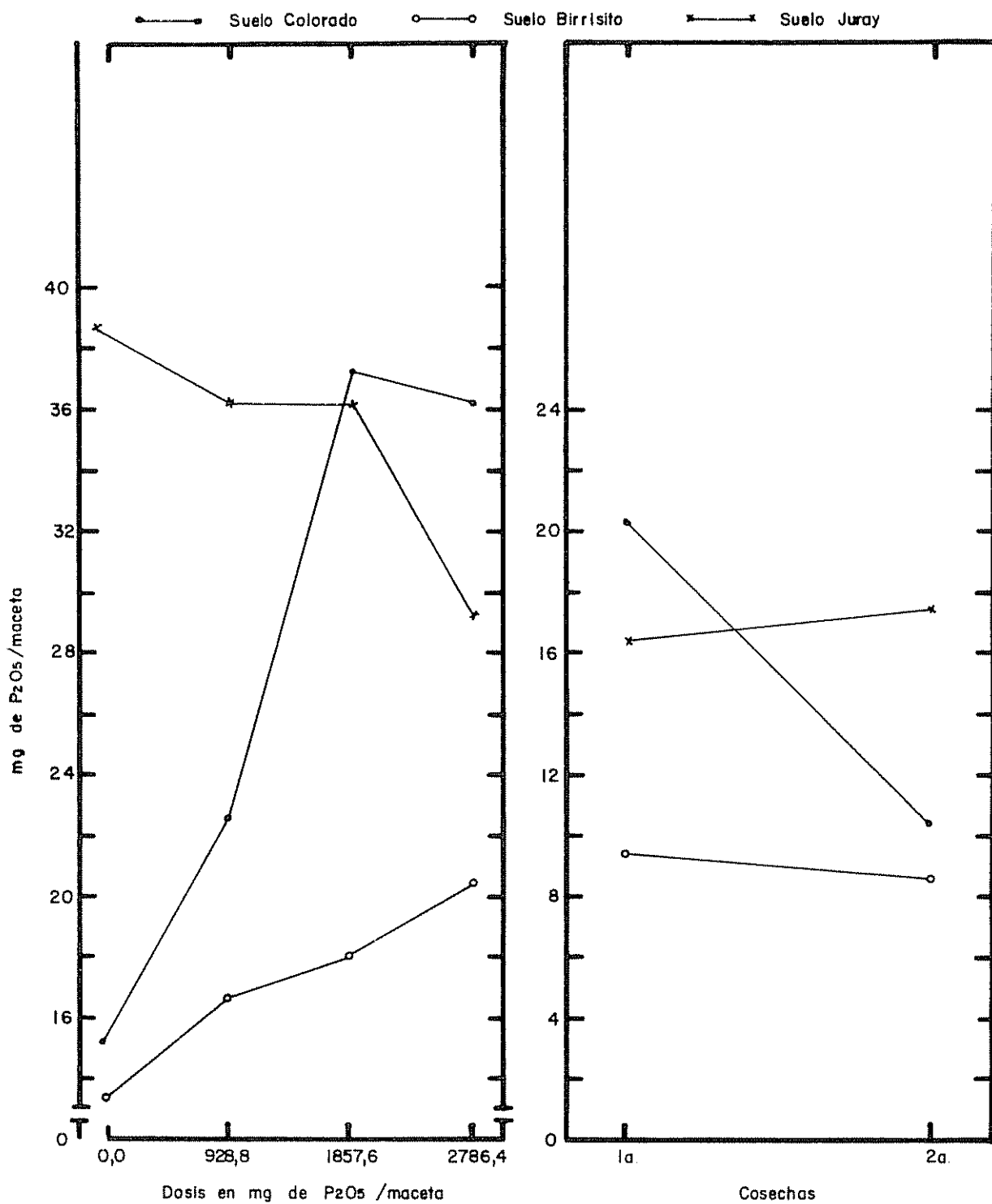


Fig. 3 Efecto de dosis y cosecha en la absorción de P del suelo

..... 928,8 mg de P₂O₅ /maceta
 - - - - - 1857,6 mg de P₂O₅ /maceta
 ————— 2786,4 mg de P₂O₅ /maceta

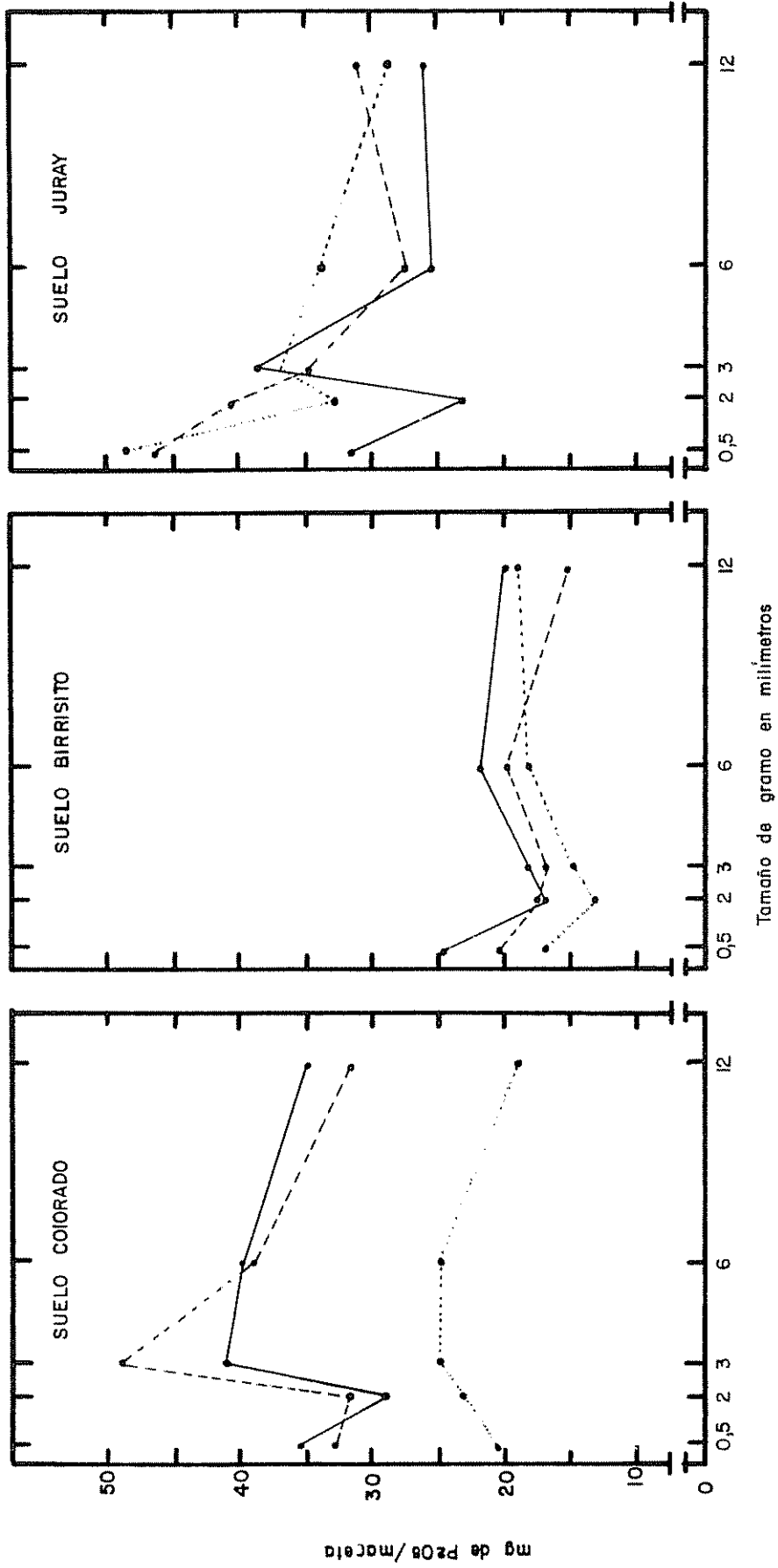


Fig.4 Efecto de tamaños de grano y dosis en la absorción de P del suelo

revés salvo entre los tamaños de 0,5 y 2 mm de diámetro; el suelo Colorado mostró aumentos decrecientes en la extracción del P del suelo, produciéndose un máximo entre los tamaños de grano de 3 y 6 milímetros de diámetro para luego disminuir.

En la Figura 2 se puede observar también las interacciones tamaño de granos x dosis y tamaño de granos x cosecha en la absorción de P del fertilizante en los suelos Colorado, Birrisito y Juray. En general, el aumento del tamaño de los granos produjo incrementos decrecientes en la extracción de P del fertilizante, pero se observa que estos incrementos se prolongaron hasta tamaños de grano mayores en la segunda cosecha; asimismo el tamaño de granos que provocó la extracción máxima de P del fertilizante varió con la dosis. Estas interacciones se observan con mayor claridad en las Figuras 5 y 6.

En la Figura 5 se observa que para una dosis determinada, la disponibilidad del P del fertilizante aumentó con el tamaño de las partículas hasta un tamaño dado que fue, en general, mayor en la segunda cosecha. Asimismo, los tamaños de grano "óptimos" correspondieron a partículas más grandes en el suelo Colorado (6-12 mm) que en el Birrisito (alrededor de 6 mm) y se lograron con partículas relativamente pequeñas en el Juray (2-6 mm), en la primera cosecha; en cambio, en la segunda cosecha hubo una tendencia general, en todos los suelos, de aumento de la disponibilidad del P del fertilizante con el tamaño de los granos hasta las partículas más grandes, lo que es especialmente notorio con las dosis más bajas. La interacción tamamaño de granos x dosis se observa más claramente en la Figura 6; así,

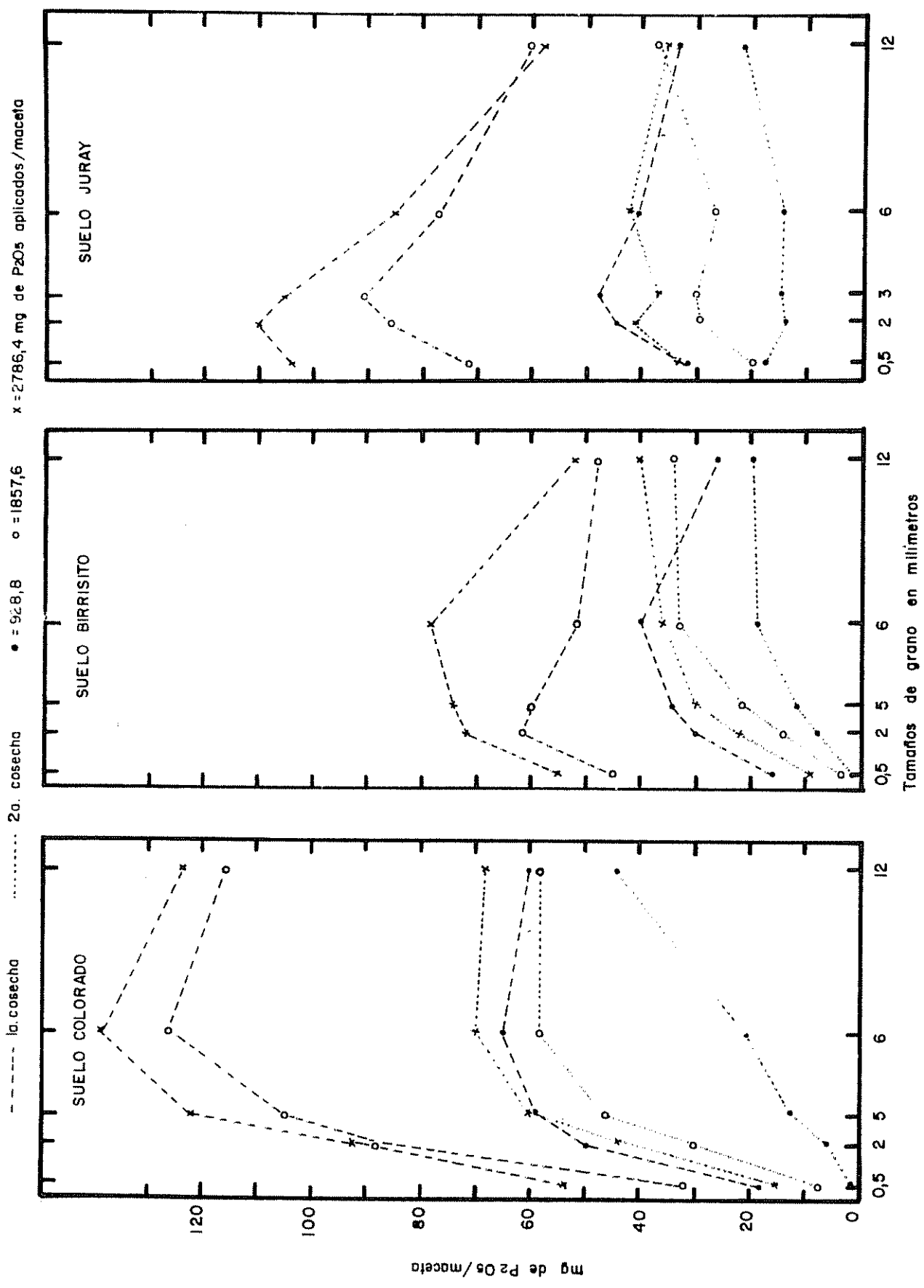


Fig. 5 Efecto del tamaño de granos y dosis en la absorción de P del fertilizante en dos cosechas sucesivas

x = 2786,4 mg de P_2O_5 /maceta
 o = 1857,6 mg de P_2O_5 /maceta
 ● = 928,8 mg de P_2O_5 /maceta

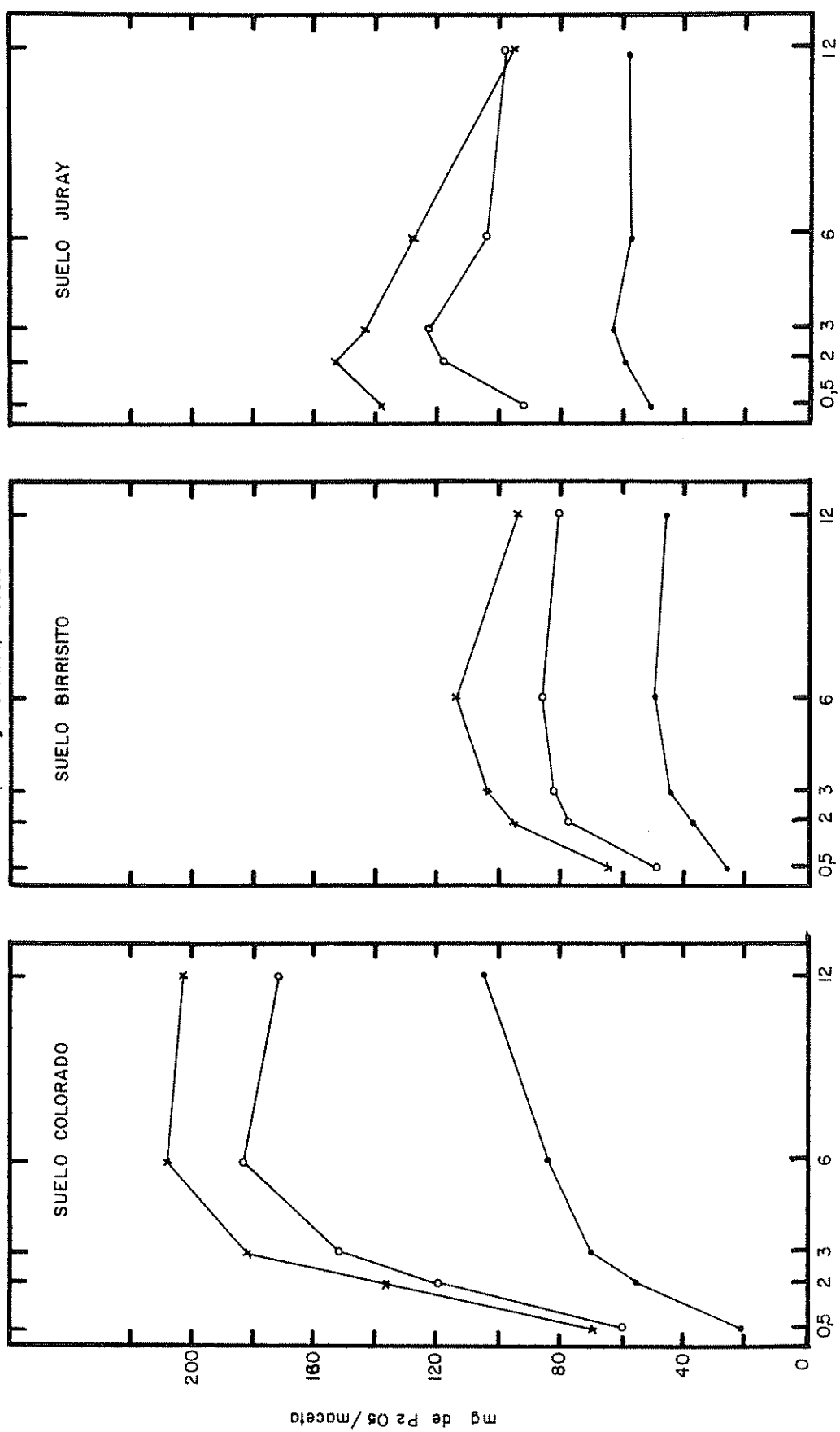


Fig. 6 Efecto del tamaño de granos, y dosis en la absorción total de P del fertilizante

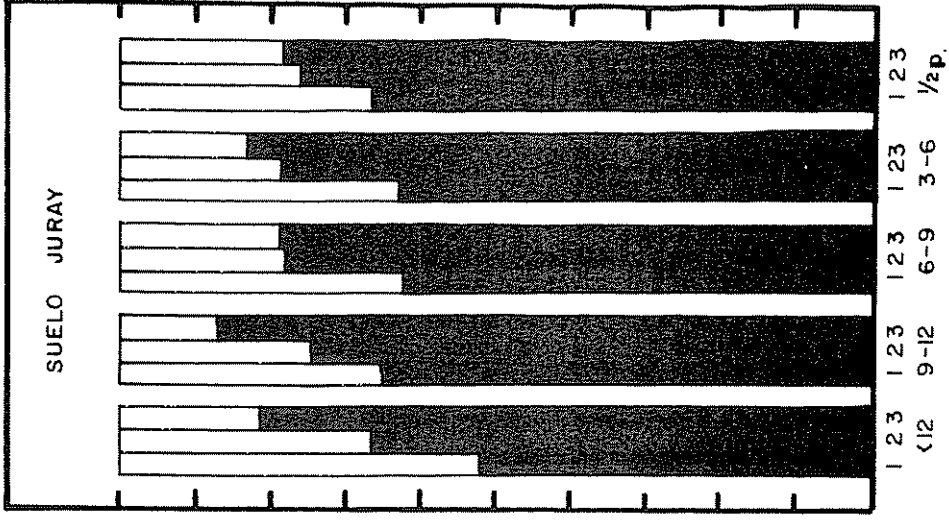
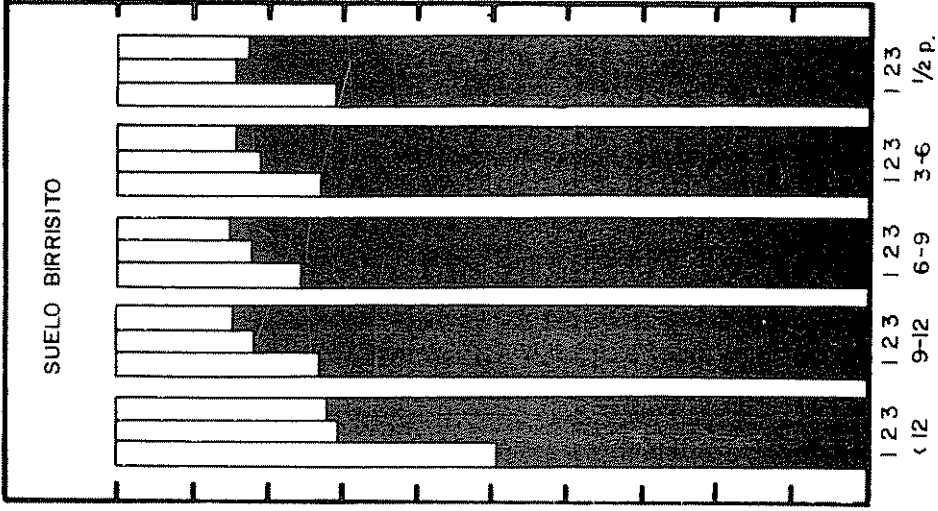
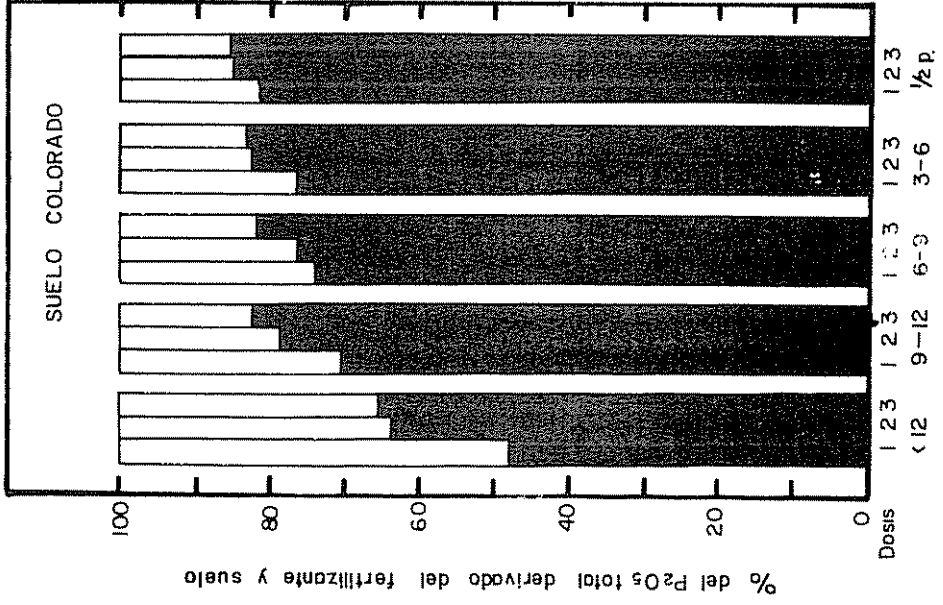
en el suelo Colorado, la absorción máxima se produjo con el tamaño de granos mayor (12 mm) con la dosis de 928,8 mg de P_2O_5 /maceta y correspondió a un tamaño de 6 mm con las dosis siguientes; en el suelo Birrisito la absorción máxima se produjo con granos de 6 mm en las tres dosis, pero mientras en las dos primeras la absorción de P del fertilizante tendió a mantenerse constante entre los granos de 6 y 12 mm, en la dosis más alta la absorción o "disponibilidad" disminuyó con el tamaño mayor de granos; en el suelo Juray la "disponibilidad máxima" ocurrió con tamaños de grano de 2 mm en la dosis más alta y 3 mm en las dosis menores.

Con base en lo expuesto es posible hacer algunas generalizaciones sobre el efecto del tamaño de granos en la disponibilidad del P del fertilizante en el sentido que la disponibilidad aumentó con el tamaño de granos, pero, a corto plazo (primera cosecha) las disponibilidades máximas se produjeron con granos de diámetro inferior que a más largo plazo (segunda cosecha); o sea que las partículas más grandes son especialmente ventajosas en relación al efecto residual del fertilizante; por otra parte el efecto de la granulación del fertilizante en su disponibilidad varió con los suelos, siendo más notoria en el suelo Colorado, luego el Birrisito y por último el Juray.

Los efectos del tamaño de grano y dosis en la absorción del P del fertilizante y del suelo se pueden también expresar mediante las variaciones de sus proporciones relativas en el P total absorbido, como se indica en la Figura 7.

Dosis 1 = 928,8 mg de P₂O₅ /maceta
 Dosis 2 = 1857,6 mg de P₂O₅ /maceta
 Dosis 3 = 2786,4 mg de P₂O₅ /maceta

■ P₂O₅ del fertilizante como % del total
 □ P₂O₅ del suelo como % del total



Tamaños de granos en mallas /pulg²

Fig. 7 Efecto del tamaño de granos y dosis en la distribución del P del fertilizante y suelo como % del P total absorbido

4.2.3. Efectos de los tratamientos en la eficiencia del superfosfato concentrado

En las Figuras 8, 9, 10 y 11 se indican los efectos del tamaño de granos, dosis y cosecha en la eficiencia del superfosfato concentrado en los suelos Colorado, Birrisito y Juray. La "eficiencia" fue estimada a través del por ciento de recuperación del P_2O_5 aplicado a los suelos por lo cual fue afectada por los tratamientos en forma muy similar a la extracción de P del fertilizante, salvo para el efecto de las dosis.

En las Figuras 8, 9 y 10 se indican los efectos del tamaño de granos, dosis y cosecha en la eficiencia del superfosfato concentrado para los suelos Colorado, Birrisito y Juray, respectivamente. En los suelos Colorado y Birrisito el aumento de las dosis aplicadas disminuyó la eficiencia; en el suelo Juray la dosis tiende a producir un mínimo, pues la eficiencia fue mayor con la dosis más alta, disminuyó con la intermedia y subió nuevamente con la más baja.

El aumento del diámetro de los granos produjo incrementos decrecientes de la eficiencia en todos los suelos en la primera cosecha y el tamaño "crítico", al cual corresponde la eficiencia máxima y sobre el cual ésta disminuye, fue mayor en el suelo Colorado (6-12 mm) que en el Birrisito (3-6 mm) y menor en el Juray (alrededor de 3 mm). En la segunda cosecha los efectos de la granulación fueron diferentes a la primera en el sentido de que aunque se produjeron incrementos decrecientes según el aumento del tamaño de las partículas, no se alcanzó a producir un máximo, tendiendo siempre a un aumento de la

SUELO COLORADO

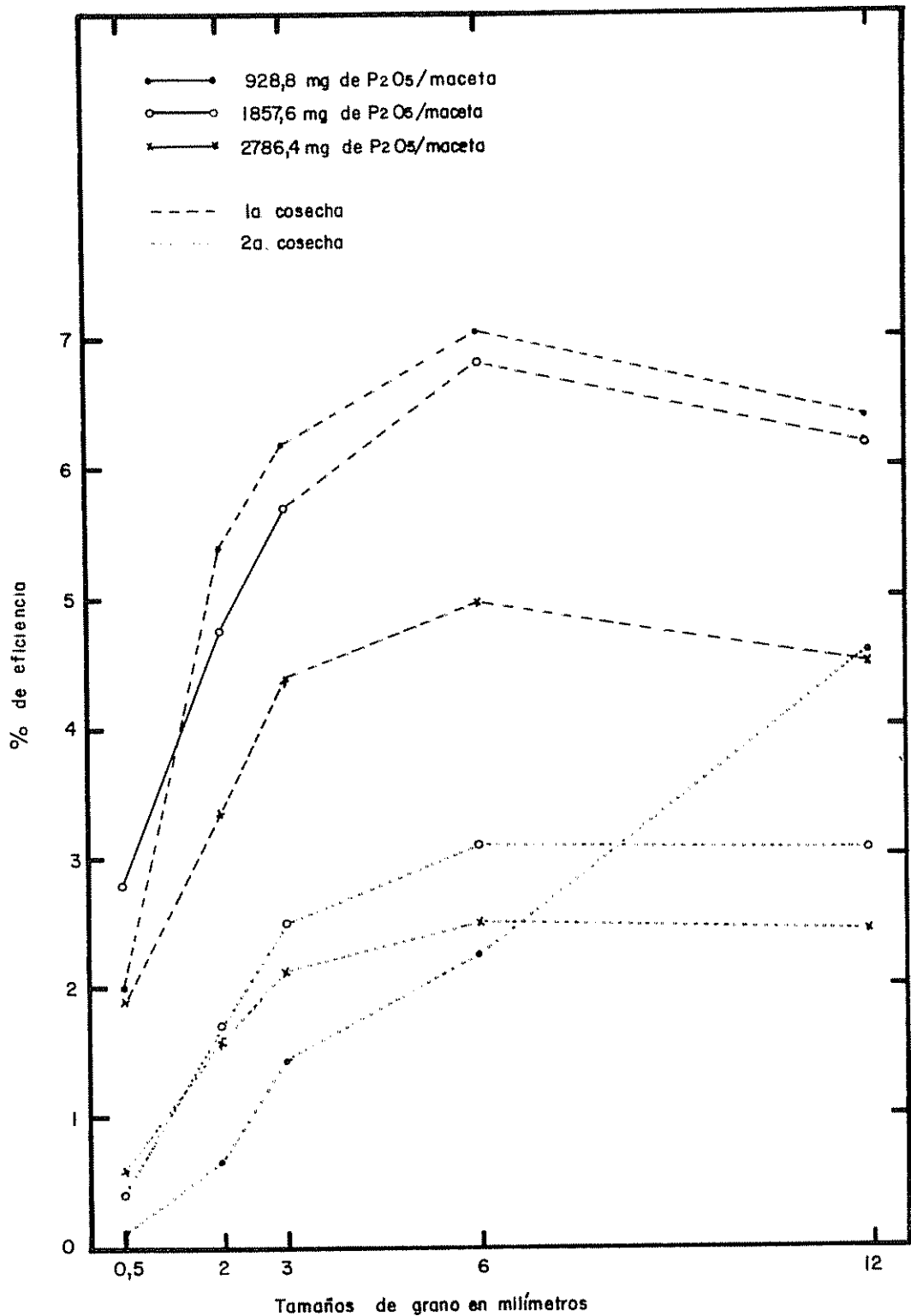


Fig. 8 Efecto del tamaño de granos, dosis y cosecha en la eficiencia del superfosfato concentrado en el suelo Colorado

SUELO BIRRISITO

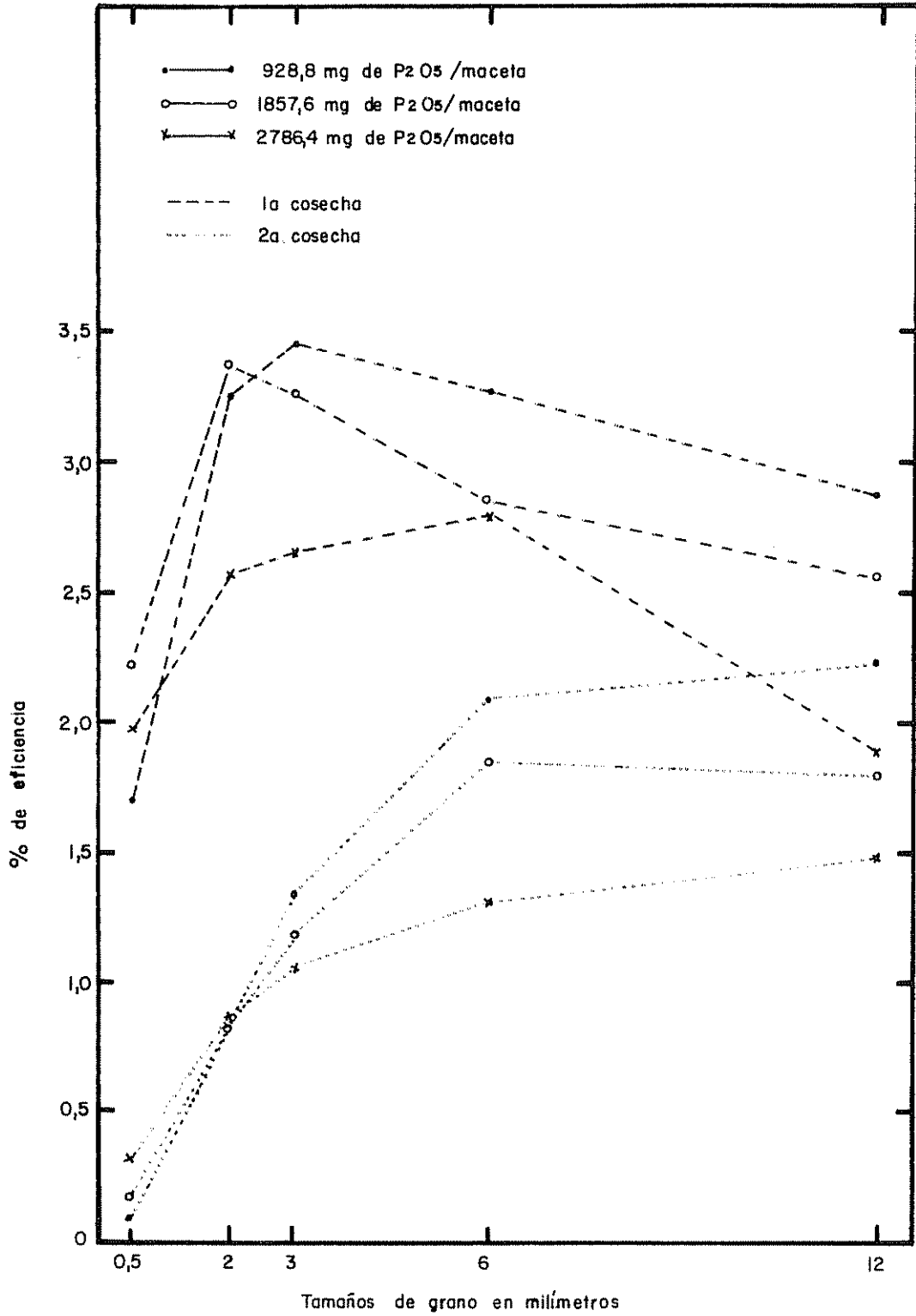


Fig. 9 Efecto del tamaño de granos, dosis y cosechas en la eficiencia del superfosfato concentrado en el suelo Birrisito

SUELO JURAY

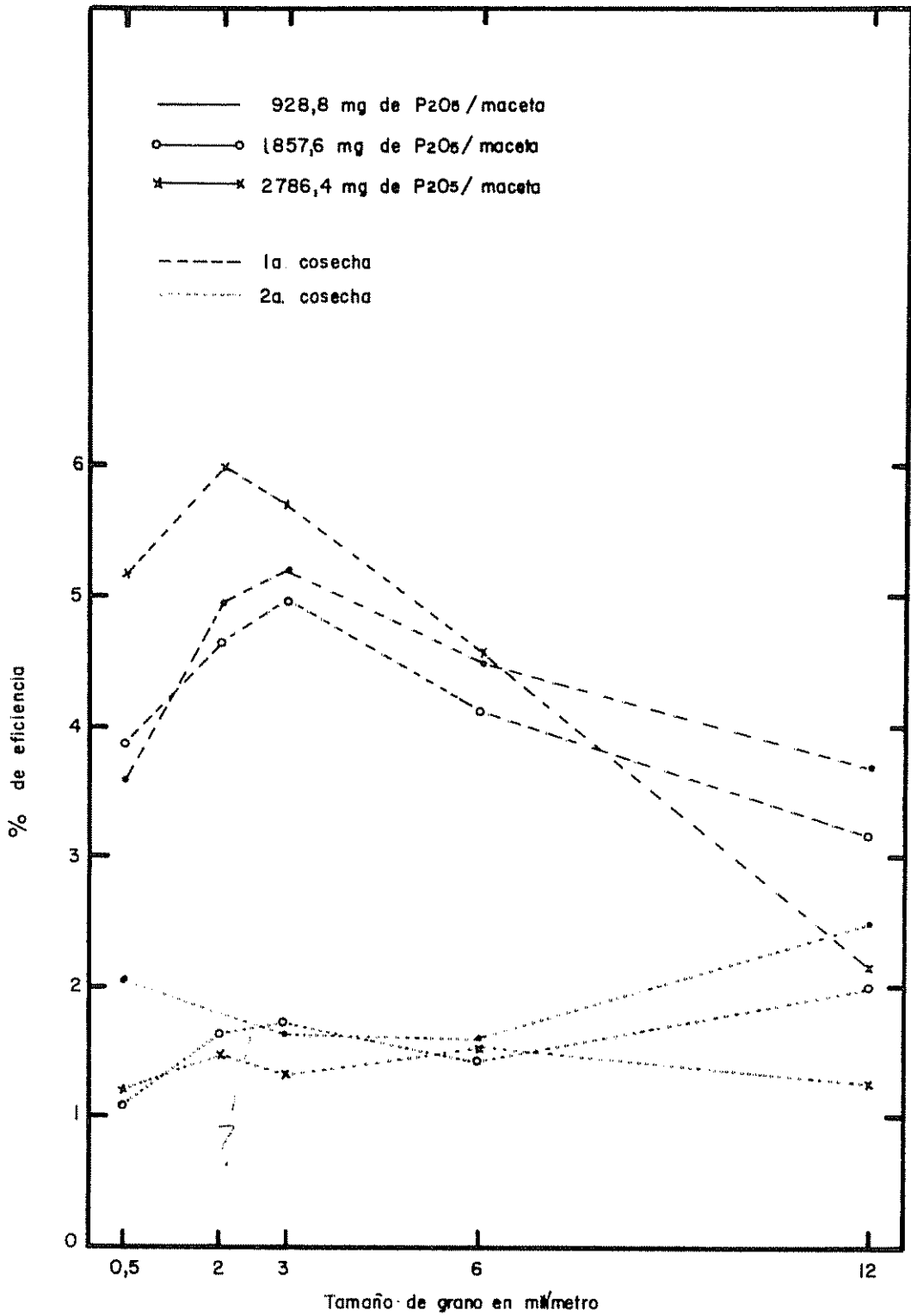


Fig 10 Efecto del tamaño de granos, dosis y cosecha en la eficiencia del superfosfato concentrado en el suelo Juray

eficiencia hasta con las partículas más grandes. Esto es válido especialmente para los suelos Colorado y Birrisito con las dosis más bajas y no ocurre en el Juray con la dosis más alta.

Sin embargo debe tenerse en cuenta que el efecto de dosis es en realidad transitorio, producto de un período o intensidad de extracción determinado. O sea que el efecto de dosis sólo tiene significancia cuando se evalúa la eficiencia en períodos determinados de tiempo. A más largo plazo el comportamiento de las dosis más elevadas tenderá a ser el mismo de las dosis bajas, debido a que a las plantas les "ha faltado tiempo" para extraer el P del fertilizante que es aún disponible. Esto no quiere decir que la dosis no tenga una importancia agronómica como se verá en la discusión sino que tiene por objeto ayudar en la interpretación de su efecto, que es función del tiempo. Con base en lo indicado y tal como se observa en las Figuras 8, 9 y 10, para cada uno de los suelos, el aumento del tamaño de los granos subió el por ciento de eficiencia del fertilizante, pero los tamaños de grano "críticos" son menores cuando se evalúa la eficiencia a corto plazo que cuando se estudia el efecto residual.

El efecto del tamaño de granos al final de las dos cosechas puede observarse en la Figura 11. Si se considera que el efecto a largo plazo está dado por las tendencias producidas con la granulación a dosis relativamente bajas, se puede decir que en el suelo Colorado el aumento del diámetro de los granos desde 0,5 a 12 mm produjo aumentos casi constantes (decreciendo levemente) en la eficiencia. Lo

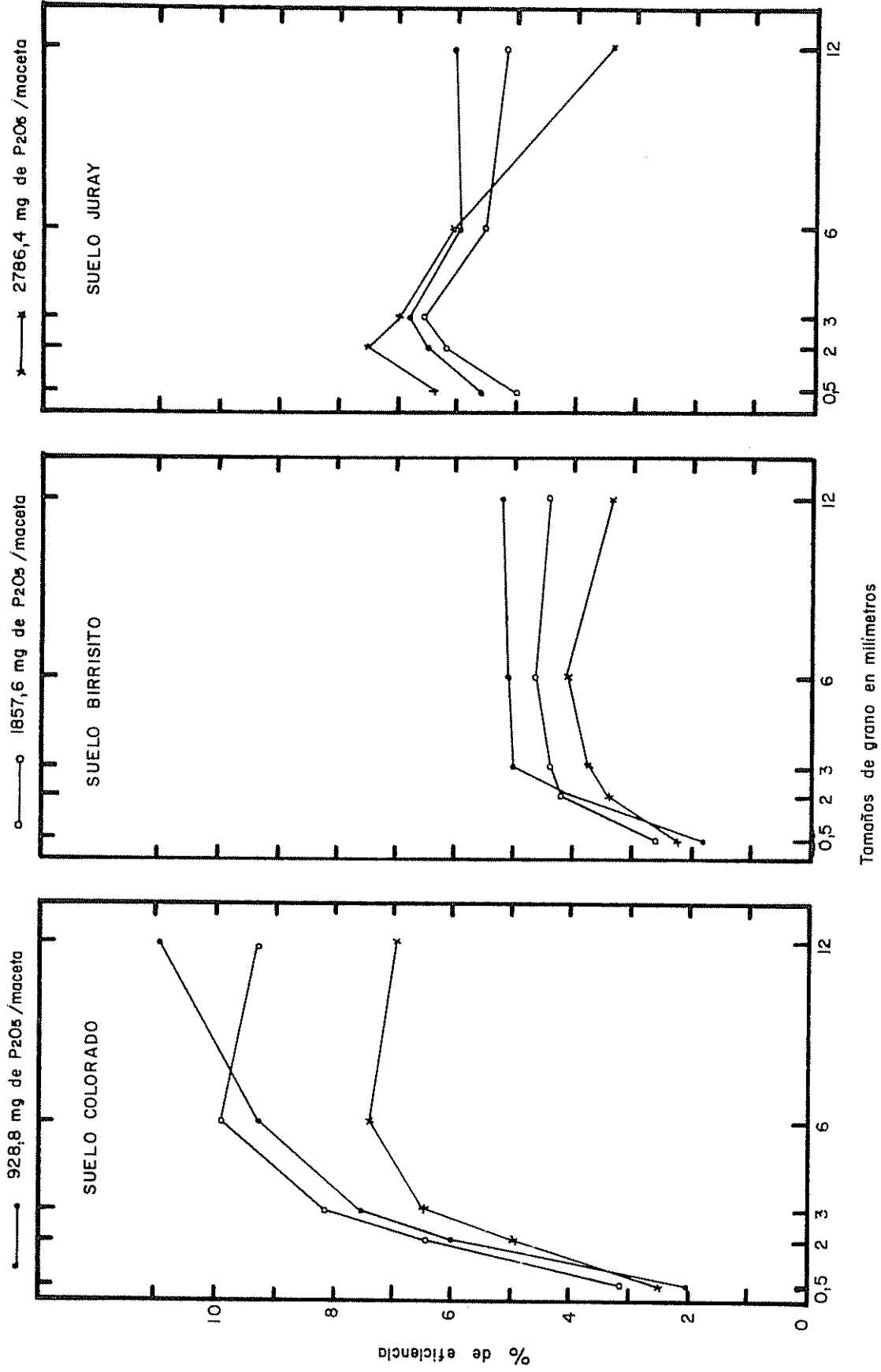


Fig. II Efecto del tamaño de granos y dosis en la eficiencia final del superfosfato concentrado en los suelos Colorado, Birrisito y Juray

mismo ocurrió con el suelo Birrisito, aunque con tamaños de granos mayores de 3 mm la eficiencia aumentó muy levemente, manteniéndose casi constante; por último, en el suelo Juray el aumento del tamaño de granos desde 0,5 a 3 mm produjo aumentos decrecientes en la eficiencia y con tamaños mayores la eficiencia disminuyó considerablemente.

Sin embargo, ya que para las condiciones en que se realizaron los experimentos tuvieron efectos significativos el tamaño de granos y dosis, sería interesante conocer cuáles tratamientos o combinaciones de ellos producen las eficiencias máximas en las condiciones dadas. Ello resulta difícil señalarlo a través de las Figuras construídas puesto que se tienen relativamente pocos puntos de observación y con espaciamentos inscontantes, por lo que no es posible deducir directamente los valores "críticos" para la eficiencia. Para ello se realizó una interpretación de la eficiencia mediante "superficies de respuesta". Se calcularon las ecuaciones de regresión cuadrática que definen la eficiencia en función del tamaño de granos y dosis en base a los datos encontrados; estas ecuaciones, donde "y" es la eficiencia; " X_1 " dosis y " X_2 " el tamaño de granos fueron:

$$y = 1,09 + 6,12 \cdot 10^{-3} X_1 + 1,35 X_2 - 6 \cdot 10^{-6} X_1^2 - 7,94 \cdot 10^{-2} X_2^2 \\ - 1,47 \cdot 10^{-4} X_1 X_2$$

$$y = 1,69 + 2,53 \cdot 10^{-3} X_1 + 4,15 \cdot 10^{-1} X_2 - 2 \cdot 10^{-6} X_1^2 - 2,76 \cdot 10^{-2} X_2^2 \\ - 1,06 \cdot 10^{-4} X_1 X_2$$

$$y = 4,21 - 2,43 \cdot 10^{-3}X_1 + 4,94 \cdot 10^{-1}X_2 + 4 \cdot 10^{-6}X_1^2 - 3,05 \cdot 10^{-2}X_2^2 \\ - 4,17 \cdot 10^{-4}X_1X_2$$

para los suelos Colorado, Birrisito y Juray, en la primera cosecha, respectivamente.

Las ecuaciones de regresión para la eficiencia final (suma de las dos cosechas) fueron en el mismo orden:

$$y = 1,04 + 1,22 \cdot 10 X_1^{-2} + 2,22 X_2 - 1 \cdot 10^{-5}X_1^2 - 1,08 \cdot 10^{-1}X_2^2 \\ - 5,73 \cdot 10^{-4}X_1X_2$$

$$y = 1,52 + 3,06 \cdot 10^{-3}X_1 + 9,21 \cdot 10^{-1}X_2 - 3 \cdot 10^{-6}X_1^2 - 4,98 \cdot 10^{-2}X_2^2 \\ - 2,49 \cdot 10^{-4}X_1X_2$$

$$y = 6,07 - 3,26 \cdot 10^{-3} \cdot X_1 + 5,43 \cdot 10^{-1}X_2 + 4 \cdot 10^{-6}X_1^2 - 2,68 \cdot 10^{-2} \cdot X_2^2 \\ - 5,13 \cdot 10^{-4}X_1X_2$$

Se observa que tanto para la primera cosecha como el total en los suelos Colorado y Birrisito las ecuaciones de regresión dan un máximo ya que los coeficientes b_1 y b_2 son positivos; en cambio en el suelo Juray no se produce máximo ya que aunque el factor tamaño de granos tiende a producirlo (b_1 positivo) el factor dosis tiende a un mínimo (b_2 negativo) por lo que la ecuación total no produce máximo ni mínimo (ensilladura).

Solamente en los suelos Colorado y Birrisito es posible calcular las combinaciones de tamaño de grano y dosis que producen la eficiencia máxima. Estas combinaciones resultaron ser de:

411,38 mg de P_2O_5 /litro de suelo y 8,06 mm de diámetro de granos y 343,69 mg de P_2O_5 /litro de suelo y 9,37 mm de diámetro de granos para el suelo Colorado en la 1a cosecha y final, respectivamente. Para el suelo Birrisito las combinaciones de dosis y tamaños de grano que maximizan la eficiencia correspondieron a 456,01 mg de P_2O_5 /litro de suelo y 6,65 mm de diámetro en la primera cosecha y 142,23 mg de P_2O_5 /litro de suelo y 8,54 mm de diámetro para la eficiencia final. Las eficiencias máximas, logradas con las combinaciones señaladas, fueron de 7,89% y 11,45% en el suelo Colorado y 3,64% y 5,82% en el suelo Birrisito, para la primera cosecha y total, respectivamente.

Puede observarse, al comparar los valores de las variables independientes que maximizan la eficiencia en la primera cosecha y final, que las "dosis óptimas" finales son algo inferiores que las correspondientes a la primera cosecha y que los tamaños de grano "óptimos" finales son superiores debido a la influencia ya descrita del "efecto residual" (segunda cosecha) en la eficiencia final.

La influencia relativa de la dosis y el tamaño de granos en la eficiencia se puede estimar comparando los valores de los factores b_1 y b_2 de las ecuaciones de regresión; como b_2 fue siempre muy superior a b_1 , se desprende de ello que la influencia de los tamaños de grano fue muy superior a la de las dosis. Debido a esto, al dibujar las isocuantas de eficiencia estas corresponden a rectas que varían de posición en función de los tamaños de grano (W_2) pero que se extienden en forma paralela a lo largo del eje de las dosis (W_1); sin

embargo corresponden a elipses cuyos focos están muy separados y por ello se asemejan a rectas al calcularlas según las dosis y tamaños de grano utilizados en el experimento. En la Figura 1 del Apéndice pueden observarse las isocuantas para la eficiencia final en los suelos Colorado y Birrisito.

A partir de las ecuaciones de regresión de la eficiencia pueden dibujarse las curvas de respuesta de la eficiencia en función del tamaño de granos. En las Figuras 2 y 3 del Apéndice pueden observarse las respuestas de la eficiencia en la primera cosecha y final para los suelos Birrisito y Colorado. Las curvas se calcularon transformando las ecuaciones de regresión originales en simples, fijando en cada caso los valores de " X_2 " (dosis) con aquellos que maximizaron la función y asimilando los valores resultantes a b_0 (constante), resultando una ecuación de regresión simple en que la eficiencia (" y ") es función sólo de los tamaños de grano (" X ").

En el caso del suelo Juray no es posible hacer esta transformación ya que la ecuación original no produce máximo, tampoco es conveniente fijar una dosis arbitraria o alguna de las empleadas en los tratamientos para realizar la transformación señalada, pues debido a que el ajuste (R^2) de estas ecuaciones fue bajo, se produce mucha dispersión entre los puntos calculados y los observados.

Resumiendo todo lo expuesto, puede decirse que en todos los suelos el aumento del tamaño de los granos provocó aumentos de la eficiencia del superfosfato concentrado, encontrándose un tamaño "crítico" que maximizó la eficiencia; el aumento de las dosis, para un

período de extracción determinado, tendió a bajar la eficiencia, y los tamaños de grano "crítico" fueron mayores en la segunda cosecha que en la primera, lo que indicaría que a largo plazo los tamaños más grandes serían los más eficientes aunque limitan la disponibilidad de P a corto plazo.

Los suelos se comportaron en forma distinta; los valores mayores de eficiencia se lograron en el suelo Colorado y los menores en el Birrisito; los tamaños de grano "críticos" fueron también distintos según el suelo; así en el suelo Colorado, para la eficiencia final, los tamaños "críticos" fueron de 9,37 mm; para el suelo Birrisito fueron de 8,88 y de sólo alrededor de 3 mm para el suelo Juray.

4.2.4. Efecto de los tratamientos en el valor "A"

El efecto del tamaño de granos, dosis y cosecha en el valor "A" se indica en el Cuadro 5.

El comportamiento del valor "A" fue muy diferente en los distintos suelos y cosechas por lo que resulta difícil hacer generalizaciones; sin embargo puede apreciarse que el suelo Juray fue el que mostró la menor variabilidad. Además, el efecto de la cosecha es notorio y significativo en todos los suelos; la segunda cosecha dio valores más altos que la primera, especialmente para los tamaños de granos más pequeños y la dosis más baja.

El efecto de las dosis fue diferente según el tamaño de granos que se considere y la cosecha que se trate. Las dosis provocaron aumentos en los valores "A" correspondientes a tamaños de granos

Cuadro 5. Efecto del tamaño de granos, dosis y cosecha en el valor "A".

| Tratamientos | Tamaños de grano de maceta | Suelo Colorado | | | Suelo Birrisito | | | Suelo Juray | | |
|--------------|----------------------------|----------------|------------|-------|-----------------|------------|-------|-------------|------------|-------|
| | | 1ª cosecha | 2ª cosecha | final | 1ª cosecha | 2ª cosecha | final | 1ª cosecha | 2ª cosecha | final |
| 928,8 | 0,5 | 648 | 7895 | 1017 | 536 | 9548 | 959 | 620 | 1256 | 864 |
| | 2 | 272 | 1464 | 388 | 228 | 886 | 341 | 320 | 1090 | 513 |
| | 3 | 239 | 709 | 327 | 234 | 459 | 302 | 295 | 1242 | 541 |
| | 6 | 230 | 364 | 272 | 265 | 460 | 346 | 337 | 1148 | 553 |
| | 12 | 198 | 139 | 171 | 382 | 382 | 372 | 411 | 557 | 476 |
| 1857,6 | 0,5 | 813 | 2823 | 1059 | 488 | 5119 | 780 | 664 | 1820 | 929 |
| | 2 | 420 | 707 | 506 | 306 | 866 | 423 | 381 | 1389 | 645 |
| | 3 | 543 | 657 | 540 | 246 | 845 | 409 | 376 | 940 | 529 |
| | 6 | 523 | 333 | 395 | 251 | 681 | 427 | 390 | 819 | 506 |
| | 12 | 397 | 162 | 351 | 265 | 470 | 354 | 367 | 960 | 603 |
| 2786,4 | 0,5 | 1136 | 2323 | 1456 | 738 | 3208 | 1073 | 313 | 1631 | 655 |
| | 2 | 557 | 619 | 578 | 383 | 889 | 508 | 244 | 856 | 425 |
| | 3 | 676 | 519 | 634 | 244 | 990 | 488 | 669 | 1012 | 766 |
| | 6 | 550 | 490 | 529 | 355 | 867 | 557 | 481 | 824 | 564 |
| | 12 | 518 | 491 | 514 | 562 | 620 | 590 | 642 | 957 | 707 |

mayores de 0,5 mm en la primera cosecha y final. En el caso de la segunda cosecha las dosis provocaron aumentos en los valores "A" correspondientes a granos mayores de 2 mm. Sin embargo es interesante hacer notar que las variaciones mencionadas fueron significativas en el caso de los suelos Colorado y Birrisito pero no en el Juray (Cuadro 3 del Apéndice).

Los tamaños de grano produjeron variaciones significativas de los valores "A" en todos los suelos y para todas las dosis y cosechas pero estas variaciones no mostraron una tendencia constante; los valores "A" disminuyeron abruptamente al aumentar los tamaños de los granos entre 0,5 y 2 a 3 mm para luego seguir disminuyendo levemente en el caso del suelo Colorado, tender a aumentar levemente en el suelo Birrisito y mantenerse relativamente constante en el caso del suelo Juray. Esto es válido para todas las cosechas en todos los suelos, salvo para la segunda cosecha de los suelos Birrisito y Colorado donde los valores "A" tendieron a disminuir con el aumento del diámetro de los granos.

En la Figura 12 se pueden observar las principales tendencias observadas, a través del efecto del tamaño de granos y dosis en el valor "A" final para los suelos Colorado, Birrisito y Juray.

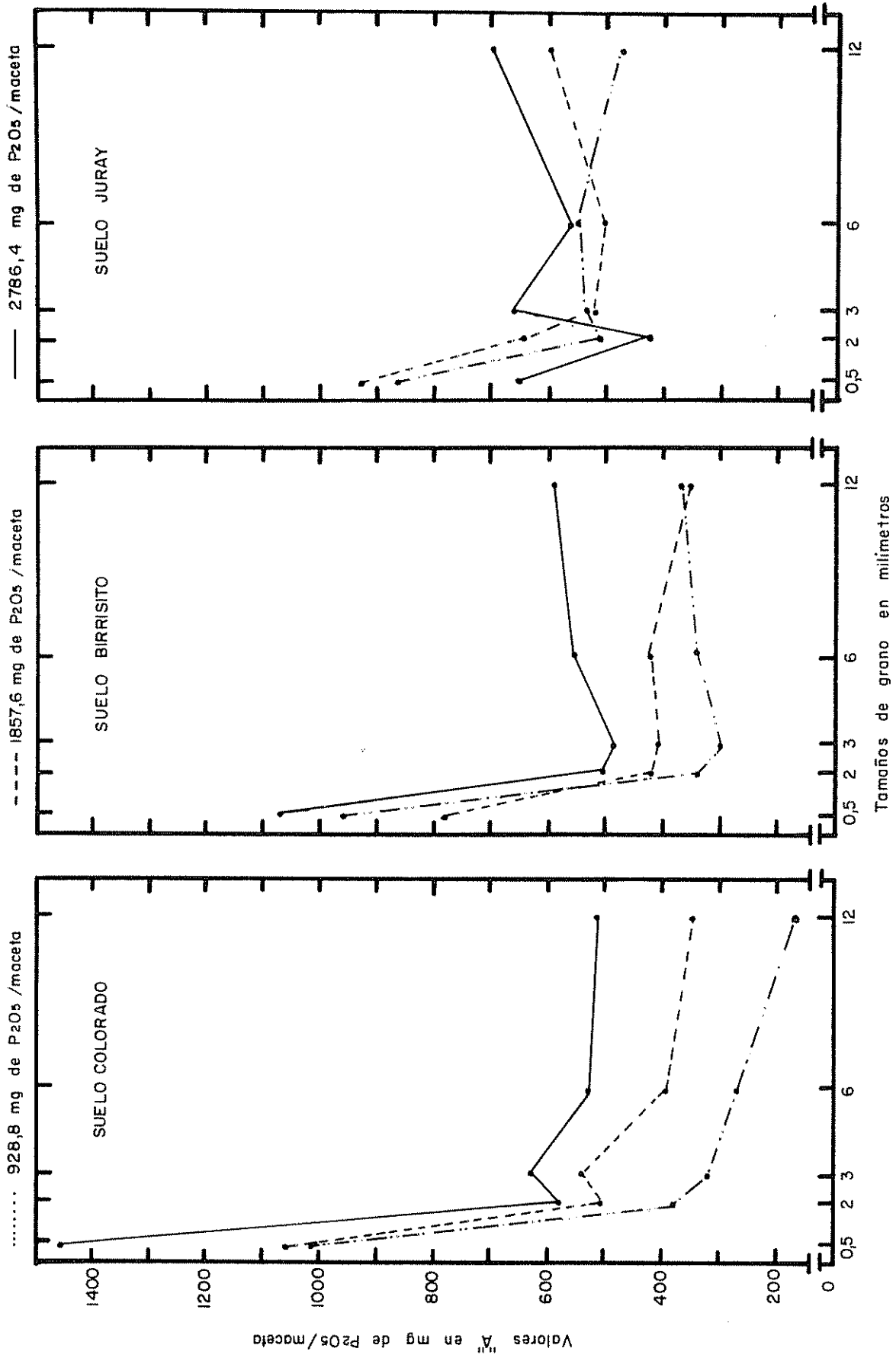


Fig. 12 Efecto del tamaño de granos y dosis en los valores "A" finales

5. DISCUSION

Antes de entrar a la discusión de los resultados experimentales es conveniente discutir algunos aspectos de la metodología utilizada, especialmente en lo referente a los tamaños de grano utilizados y la forma de expresarlos.

En los trabajos consultados sobre comparaciones de distintos tamaños de grano de superfosfato concentrado, todos los autores coinciden en emplear los calibres de tamices (mallas) para definir el tamaño de las partículas, y al igual que en el presente trabajo los tratamientos no han correspondido a un tamaño específico sino a un rango de tamaños (6 a 12 mallas, etc.). Sin embargo hay algunas diferencias entre los tamaños de grano usados en la literatura y en este trabajo; en primer lugar, en la literatura consultada no se experimentó con tamaños de grano tan grandes como los usados en este experimento (hasta 1/2 pulgada de diámetro) sino que correspondieron a granos incluso inferiores a los diámetros de los granos más pequeños utilizados en esta investigación y en segundo lugar los rangos de tamaños de grano correspondientes a cada tratamiento fueron en general mayores a los de la presente investigación. Así, Thorne, Johnson y Seatz (54) utilizaron tamaños de grano de -40, -6 y -4 mallas/pulgada. Bouldin, DeMent y Sample (4) utilizaron partículas de 9 a 14, 16 a 20, 28 a 35, 35 a 48 y 48 a 60 mallas. Terman, Bouldin y Webb (50) emplearon tamaños de grano de 16 a 20, 28 a 35, 35 a 48 y 48 a 60 mallas. Terman, DeMent, Clements y Lutz (52) utilizaron como tratamientos granos de 6 a 14 y menos de 35 mallas. Terman, Anthony,

Mortensen y Lutz (49) trabajaron con granos de 6 a 14, 14 a 35 y menos de 35 mallas. Lawton y Cook (29) con granos de hasta 4 a 6 mallas. Terman y Allen (48) emplearon granos de 6 a 9 mallas y menos de 35 mallas y Bouldin y Sample (6) compararon granos de 9 a 14 y 28 a 35 mallas. O sea que los granos más grandes utilizados en la literatura consultada han sido de 4 mallas.

A pesar de ser la forma generalizada de expresión, las mallas/pulgada no dan una idea clara del espaciamiento entre tratamientos; por esto en el presente trabajo se tradujeron a milímetros de diámetro como puede observarse en las figuras del Capítulo de Resultados. Sin embargo esta nueva forma de expresión de los tamaños de grano es inadecuada en el sentido que se pierde la idea de rango de tamaños de partículas que existe en cada tratamiento, además es difícil establecer cuál es el diámetro medio en cada caso; los diámetros elegidos como representativos (dominantes) en cada tratamiento se obtuvieron por observación directa de los gránulos y no corresponden a mediciones precisas sino a aproximaciones. Hay que tener en cuenta, además, que las partículas no tenían forma esférica aunque las más grandes tendían a serlo, siendo cada vez más irregulares según disminuían en tamaño.

La forma más adecuada de expresar el tamaño de granos es a través de la determinación de sus superficies específicas (cm^2/gramo) ya que con la granulación de los fertilizantes lo que se pretende es limitar el área de reacción entre una determinada masa de fertilizante y el suelo (para disminuir el proceso de "fijación"). Bouldin y

Sample (5) han señalado una fórmula para calcular la superficie específica de los fertilizantes granulados; sin embargo esta fórmula asume que los granos son esféricos y cuyos diámetros son conocidos, lo que no ocurrió con las partículas utilizadas en el presente trabajo. Además hay que considerar que las paredes de los gránulos no son lisas, aunque tienden a serlo en los granos más grandes; pero en las partículas más pequeñas aparecen aristas y las superficies son rugosas, de manera que el área específica no es sólo función del diámetro de las partículas. Por último, la determinación del área específica real se complicaría aún más si se considera que los granos de fertilizante son en realidad aglomeraciones de partículas muy pequeñas y por tanto constituye, cada grano, un sistema poroso con un área de exposición interna. En todo caso, es conveniente tomar en consideración los aspectos señalados, que hacen discutible las diferentes formas de expresión del tamaño de los granos para una mejor interpretación de los resultados obtenidos y estudiar en trabajos futuros la forma de solucionar sus limitaciones.

Es difícil comparar los resultados obtenidos con los de la literatura ya que se ha usado una metodología diferente (volumen de suelo; número de plantas/maceta, etc.) y suelos de distintas características; sin embargo puede señalarse que, en general, se obtuvo una mayor producción de materia seca como también una mayor extracción de P total por las plantas que en los resultados de la literatura y también fueron superiores, a los datos observados en la literatura, los por ciento del P total derivados del fertilizante. Esto se debe

a que en el presente trabajo se provocó una gran intensidad de extracción de P (6 plantas de maíz en 3 litros de suelo) por períodos de tiempo relativamente largos (2 cultivos de un mes cada uno), además se aplicaron dosis de P mayores a las indicadas en la literatura y, por último, a las características de los suelos estudiados, especialmente su bajo contenido en P "disponible" y altas capacidades de "fijación" de P. En relación a la "eficiencia" del fertilizante no pueden hacerse comparaciones porque no ha sido usado por otros autores el por ciento de recuperación como índice de "eficiencia", salvo para los datos indicados por Terman y Kasawneh (53) quienes encontraron porcentajes de recuperación entre 8 y 18%. No se encontraron, en la literatura revisada, estudios sobre eficiencia de fertilizantes fosforados en suelos "fijadores" de América Latina aunque de los datos obtenidos por Bornemisza y Fassbender (2) en un estudio de la absorción del P aplicado a suelos de Costa Rica se deduce que menos del uno por mil del P aplicado fue recuperado por las plantas. Esto se debió a que el P se agregó disuelto en agua, lo que provocó que el P reaccionara ampliamente con los suelos que lo "fijaron" casi totalmente.

Los resultados experimentales obtenidos en el presente trabajo confirmaron la hipótesis preestablecida que el tamaño de los granos del superfosfato concentrado tendría un efecto favorable en su eficiencia en los suelos estudiados. Se esperaba también que el efecto favorable de la granulación fuera más efectivo en los suelos que presentan mayores capacidades de fijación; es decir, se esperaba una

mayor respuesta a la granulación en el suelo Birrisito, luego en el Colorado y por último en el Juray en base a los por cientos de fijación determinados por Fassbender (14) que fueron de 92,4%, 66,5% y 43,3%, respectivamente. Sin embargo fue en el suelo Colorado donde el aumento del tamaño de los granos fue más efectivo en aumentar la eficiencia del fertilizante y en menor proporción en los suelos Birrisito y Juray. Tampoco hubo una relación entre los por cientos de fijación indicados en la literatura y las eficiencias medias de los fertilizantes en los distintos suelos; el suelo Birrisito, indicado como el que posee la mayor capacidad de fijación mostró, en general, las eficiencias más bajas pero en el suelo Colorado se obtuvieron ma yores eficiencias que en el Juray a pesar de que este último es seña lado como menos "fijador".

Si comparamos las eficiencias logradas en los diferentes suelos cuando se aplicó el fertilizante en forma pulverulenta (< 12 mallas), podríamos establecer índices de las capacidades de fijación respectivas ya que en esas condiciones se produjeron las mayores posibilidades de fijación. De acuerdo a ello, aparece una concordancia entre los resultados obtenidos y los de la literatura, ya que el suelo Juray mostró la menor fijación (6% de eficiencia promedio para las tres dosis); el suelo Birrisito mostró la mayor fijación (2,26% de eficiencia promedio) y el suelo Colorado una fijación intermedia (2,6% de eficiencia promedio).

Todo esto indica, en contradicción con lo que señala la literatura, que la eficiencia de la granulación no guarda relación con las

capacidades de fijación de los suelos sino que tiene una relación ca
si inversa, lo que hace necesario discutir un poco más a fondo la na
turaleza y condiciones del suelo que provocan el fenómeno de fija-
ción.

Si imaginamos un grano de fertilizante localizado en un suelo fijador que tiene un determinado contenido de humedad y ya ha empeza
do, en consecuencia, a producirse el proceso de disolución, la fija-
ción del fertilizante disuelto va a depender de las posibilidades de
que reaccione con la fase sólida "fijadora" del suelo; es decir, va
a estar dado por el movimiento del fósforo disuelto hacia el suelo.
Si el P en solución permanece estático, inmóvil no ocurrirá fijación
aunque sea muy alta la capacidad de fijación del suelo. Ahora, si
asumimos que el suelo "fijador" en cuestión no ofrece limitaciones
al movimiento del P disuelto del fertilizante, se producirá la fija-
ción de su P, la cual dependerá en rapidez y magnitud del ritmo de
disolución del P del fertilizante. En base a estas consideraciones
es entonces fácil comprender como el tamaño de granos favorece la
eficiencia del fertilizante al disminuir su ritmo de disolución y
así limitar el área de reacción entre el P disuelto y la fase fijado
ra del suelo.

En contraposición a la situación anterior, si imaginamos ahora
un gránulo de fertilizante en otro suelo que tiene una capacidad de
fijación relativamente baja pero donde el movimiento del P es tam-
bién irrestricto y la comparamos a la situación anterior del mismo
gránulo pero en un suelo de alta capacidad de fijación pero que

restringe el movimiento del P, nos encontraríamos finalmente con un resultado aparentemente contradictorio pero que es teóricamente factible: un suelo relativamente poco "fijador" puede, en la práctica, "fijar" más P de un fertilizante que un suelo altamente fijador. Resumiendo, la capacidad real de fijación de P de un suelo determinado no depende sólo de las características químicas y mineralógicas del suelo sino también de otra serie de propiedades que en último término regulan o determinan las posibilidades de que el P del fertilizante pueda difundirse a través del suelo ya sea por procesos de difusión propiamente tales (movimiento en la solución del suelo) o convección (movimiento con la solución del suelo). Sin embargo, cuando se estudian las características que determinan el movimiento de un soluto en el suelo es muy difícil, especialmente para el caso del P, separar el efecto de las propiedades químicas del suelo (fijación) con las físicas (% de humedad, porosidad, etc.) pues es fácil medir el movimiento del P pero difícil determinar cuales han sido, en último término, las características del suelo que han controlado el movimiento de fósforo y estimar la importancia relativa de los fenómenos de fijación, difusión y convección, que ocurren simultáneamente.

Day y Forsythe (8) han señalado este problema indicando que "los principales mecanismos en la transferencia de solutos en el suelo son convección (transporte por el movimiento de la fase líquida del suelo) y difusión, pero que el movimiento es generalmente modificado por procesos químicos tales como el intercambio iónico y formación de precipitados y debido a ello, la transferencia convectiva de

solutos debe ser estudiada más convenientemente en ausencia de procesos químicos interferentes o bajo circunstancias en que puedan ser controlados y medidos".

En base a todo lo expuesto se deduce que las "capacidades de fijación de P" determinadas en condiciones de laboratorio no son índices adecuados de la "capacidad de fijación real" que ocurrirá en condiciones de campo; los métodos de laboratorio determinan el porcentaje de fijación en base a la disminución en la concentración de P de una solución de concentración conocida después de agregarla a una muestra pequeña de suelo (1 g) de manera que se forme una suspensión suelo-solución en la que después de someterla a agitación mecánica por largos períodos (alrededor de 10 horas) se separa nuevamente el suelo de la solución para determinar en ésta la concentración de P final y se asume que las diferencias entre las concentraciones original y final se deben al fenómeno de "fijación". En esta forma, con la metodología explicada se provoca que todo el suelo reaccione con el P añadido lo que en la práctica, como se ha explicado, no ocurre siempre, salvo si el fertilizante es aplicado en forma de partículas muy finas (pulvulentas).

En un trabajo realizado en forma paralela al presente, Urrutia (55) estudió el movimiento del P aplicado a los suelos Colorado, Birrisito y Juray, en condiciones de laboratorio. Para ello preparó columnas que contenían los suelos y aplicó una capa de fosfato monocálcico (< 12 mallas) marcado con ^{32}P y midió, posteriormente, el movimiento del P hacia el suelo, sobre y bajo la capa de aplicación.

Encontró que el P se movilizó, desde el fertilizante hacia el suelo, mucho más en el caso del suelo Colorado que en el Birrisito y Juray, que fueron muy similares; explicó las diferencias en el movimiento del P en los suelos a través de las distintas capacidades de fijación de los mismos las que, al igual que en el presente trabajo no estuvieron asociadas a las características químicas de los suelos (Cuadro 1 de Resultados) y concluyó que "el movimiento de fósforo en los suelos dependió fundamentalmente del contenido de alófana, contrastando el comportamiento de los suelos Juray y Birrisito con el del suelo Colorado; en los primeros, con elevado contenido de alófana, el movimiento del fósforo fue considerablemente más restringido que en el suelo Colorado, con arcillas predominantemente cristalinas" (Cuadro 2 de Resultados). Sin embargo la fijación de fósforo no parece ser una razón suficiente para explicar el movimiento del fósforo del fertilizante en los suelos estudiados y además, tal como ya fue planteado al final de la Revisión de Literatura, la predominancia de las fracciones P-Al y P-Fe dentro de los fosfatos inorgánicos no significa, necesariamente, que corresponden a formas inaprovechables.

La única explicación que satisface los resultados obtenidos en los tres suelos es la "capacidad de fijación real" de los suelos, producto de la conjugación de la "capacidad potencial de fijación" de los suelos (resultante de las características químicas y mineralógicas) y del conjunto de características físicas del suelo que determinan (además de la fijación) el movimiento del fósforo del fertilizante hacia el suelo, ya sea por procesos de convección o difusión.

La dificultad estriba en separar la influencia relativa de ambos componentes ya que lo que se observa es la resultante final producto de sus interacciones.

Si asumimos que en el suelo Colorado, el movimiento del fósforo disuelto desde el fertilizante ha estado regulado principalmente por procesos de convección (movimiento del P con la solución del suelo) que son más rápidos que los de difusión, esto habría provocado, para un tamaño de grano dado, una disolución muy rápida y un consecuente desplazamiento del P a través del suelo; en tales condiciones el aumento del tamaño de granos sería muy efectivo en regular el ritmo de solubilización y por lo tanto provocarían efectos marcados en la eficiencia del fertilizante. En los suelos Birrisito y Juray la difusión habría sido más importante que la convección y en consecuencia los ritmos de solubilización habrían sido más lentos que en el suelo Colorado; en tales condiciones el tamaño de granos no fue tan efectivo en modificar la velocidad de disolución y por ello se produjeron efectos menos espectaculares que en el suelo Colorado, lo que concuerda con lo señalado por Huffman y colaboradores (24); además, con una disolución lenta se daría lugar a que el suelo que entra en contacto con el fósforo disuelto saturase totalmente su capacidad potencial de fijación ya que el tiempo de contacto sería mayor. A pesar de que las velocidades de disolución habrían sido semejantes en los suelos Birrisito y Juray, en este último, por tener una capacidad potencial de fijación menor, las eficiencias fueron más altas y los tamaños "críticos" correspondieron a diámetros menores que en el

Birrisito debido a que con ellos, al producirse una mayor velocidad de disolución, se habría logrado una intensidad (concentración) mayor de fósforo en la solución del suelo alrededor de los gránulos la que en el caso de los granos de diámetros mayores habría sido limitante para las necesidades de las plantas.

Esta última observación explica también la ocurrencia de un tamaño de grano "crítico" para la eficiencia pues llega un momento que el ritmo de solubilización limita o no es capaz de mantener concentraciones adecuadas de fósforo en la solución del suelo para las necesidades de las plantas (en un período de tiempo determinado), es decir, las velocidades de disolución llegan a ser inferiores a las de absorción de las raíces de las plantas. Además, hay que considerar que al aumentar el tamaño de los granos disminuye el número de granos correspondiente a una dosis determinada, o sea, que además de limitarse las velocidades de disolución se disminuye el volumen total de suelo que entra en contacto con el P del suelo, como asimismo, se restringe la cantidad total de P disponible para las plantas. Esto trae como consecuencia que el efecto residual de los tamaños mas grandes sea mayor (eficiencias de la segunda cosecha) ya que al disolverse lentamente, los gránulos grandes no liberaron fósforo (limitando la disponibilidad para las plantas) pero tampoco fue fijado, quedando una proporción considerable como residuo el que fue aprovechado por las plantas en el segundo cultivo.

La eficiencia fue poco afectada por las dosis, en comparación al efecto de los tamaños de grano y aunque en general se encontró

que el aumento de las dosis tendía a disminuir la eficiencia es probable que a largo plazo las dosis altas produzcan eficiencias similares a las más bajas al dar oportunidad que las plantas sean capaces de absorber un mayor por ciento del fósforo que se les ha suministrado, siempre y cuando el mayor tiempo de contacto entre el fertilizante y el suelo no de lugar a una mayor fijación, lo que no ha sido posible comprobar en este experimento.

Es difícil proyectar los resultados obtenidos en el presente experimento a las condiciones de campo debido a que se trabajó con suelos alterados (distintas densidades aparentes y probables cambios en las propiedades físicas que determinan el movimiento del fósforo en el suelo), con relaciones planta-suelo (número de plantas por volumen de suelo) que no corresponden a las de campo, períodos de tiempo de extracción relativamente cortos, todo lo cual hace difícil la transferencia de los resultados al campo. Pero es otro el factor que más limita las posibilidades de proyección de los resultados y es que en el caso del experimento de invernadero, la humedad y sobre todo, el movimiento de agua en el suelo, fue controlado mediante los riegos por capilaridad y como el suelo Colorado tuvo porcentajes de humedad inferiores (con tensiones semejantes) a los suelos Birrisito y Juray, necesitó de riegos más frecuentes, lo que se supone favoreció el movimiento convectivo del fósforo. En las condiciones de campo, estos suelos están sometidos a altas precipitaciones atmosféricas lo que provocaría un movimiento de flujo de masa de la solución del suelo (y del fósforo presente en ella) de manera que el movimiento

to final del fósforo del suelo y su consecuente efecto en la fijación podrían resultar totalmente distintos a los ocurridos en el experimento desarrollado en macetas por lo que resulta importante evaluar el efecto de los tamaños de grano en los suelos y áreas de interés, con el o los cultivos (rotación) de importancia agrícola y con diferentes períodos de extracción, combinando distintas dosis y frecuencias de aplicación del fertilizante.

Es posible que las tendencias principales encontradas en el presente experimento se mantengan al repetirse los tratamientos en el campo, aunque los tamaños de grano "críticos" podrían subir ya que debido al efecto del flujo de masa los granos grandes serían aún más efectivos en controlar el ritmo de disolución del fertilizante y además no sería la fijación la única causa limitante de la eficiencia, sino que podrían producirse pérdidas del fósforo del fertilizante debido a lixiviación, especialmente en el suelo Colorado.

Los resultados encontrados son concluyentes y justifican la continuación de estos estudios en condiciones de campo pues la regulación del tamaño de granos ha mostrado ser un método eficaz en aumentar la eficiencia del superfosfato concentrado. Al comparar en cada suelo las eficiencias mínimas y máximas producidas por los diferentes tamaños de grano se encuentra que en el suelo Colorado se aumentó la eficiencia alrededor de cinco veces, tres veces en el Birrisito y aproximadamente dos veces en el Juray lo que significaría posibilidades de ahorro en el costo de la fertilización fosfatada de un 80%, 66% y 50%, respectivamente, los que podrían aún aumentar en

condiciones de campo, como se ha señalado.

Existen, además, otras consideraciones agronómicas importantes en relación a la proyección al campo de los resultados encontrados y tienen que ver con los tamaños de grano y dosis a recomendar. Si asumiéramos que los resultados experimentales son proyectables al campo, al tomar la decisión acerca del tamaño de partículas a recomendar, el criterio a seguir no debería basarse solamente en la eficiencia máxima posible de obtener, puesto que los tamaños de grano que produjeron las eficiencias máximas no fueron los que provocaron el mayor crecimiento de las plantas; esto se debió a que, probablemente, el ritmo de solubilización de los tamaños de grano más eficientes limitó el suministro de fósforo a las plantas en los primeros períodos de crecimiento; conforme los granos se iban disolviendo aumentaron su superficie específica (cm^2/gramo) lo que aumentó el ritmo de solubilización y el suministro de fósforo a las plantas las que, finalmente, aunque absorbieron más fósforo que las de tratamientos con partículas de menor tamaño, no pudieron recuperarse, siendo su mayor absorción final de fósforo nada más que un fenómeno de "consumo de lujo" o "consumo excesivo". Sin embargo, como los tamaños de grano que produjeron los mayores rendimientos no corresponden a los más eficientes, con el objeto de obtener una eficiencia máxima sin limitar el crecimiento deberían probarse mezclas de tamaños de grano de rangos más amplios o bien utilizar los tamaños más eficientes pero aplicándolos en dosis mayores (asumiendo que la pérdida inicial de eficiencia se recuperaría con los efectos a largo plazo),

todo lo cual debería ser objeto de estudios posteriores en condiciones de campo.

Por último, en relación al concepto de eficiencia usado (% de recuperación) cabe hacer dos consideraciones. En primer lugar, debe señalarse que los por cientos de eficiencia determinados en este experimento no correspondieron exactamente a los por cientos de recuperación del P del fertilizante por las plantas ya que no se consideró el P que formó parte de los tejidos de las raíces; pero en todo caso la idea de "extracción" sigue siendo válida porque el P de las raíces volverá nuevamente al suelo a través de los procesos de mineralización. En segundo lugar, si se considera que los tratamientos afectaron la absorción de P del suelo, quizás la eficiencia debiera considerar la absorción total de P, puesto que lo que nos interesa en último término es una adecuada nutrición de las plantas para obtener los mayores rendimientos; sin embargo, para las condiciones del presente trabajo, la absorción de P del suelo influyó relativamente poco en el P total, el que fue afectado, fundamentalmente, por el P del fertilizante, de modo que las tendencias encontradas no sufrirían modificaciones de importancia si se hubiera desarrollado un concepto de eficiencia que considerara también extracción del P del suelo. Esto, indicaría que si las relaciones P del suelo/P del fertilizante fueran, en condiciones de campo, similares a las encontradas en este experimento, podrían desarrollarse ensayos de campo utilizando fertilizantes granulados no marcados con ³²P sin que ello limitase seriamente la interpretación de los resultados.

Para finalizar la discusión sobre el efecto de los tamaños de grano en la eficiencia del superfosfato concentrado, es importante señalar que los tamaños de grano "óptimos" determinados en los suelos Birrisito y Colorado fueron bastante mayores a los del superfosfato concentrado que se expende a los agricultores (alrededor de 3 mm de diámetro) lo que indicaría que al usar tamaños de grano más adecuados (mayores) se lograría un ahorro considerable en el costo de la fertilización fosforada en los suelos indicados. Esto cobra mayor importancia si es que, como se ha señalado, en las condiciones de campo los tamaños de grano "óptimos" fueran aún mayores a los encontrados en condiciones de invernadero.

Para discutir el efecto de los tratamientos en los valores "A" calculados es necesario hacer antes algunas consideraciones.

En primer lugar, en la literatura consultada se ha encontrado una serie de trabajos que han tratado de evaluar el comportamiento del valor "A" en función, principalmente, de la planta extractora utilizada, fuente de fósforo, tiempo de extracción, forma de aplicación del fertilizante (localización), tipo de suelo, humedad del suelo, influencia de otros nutrimentos y niveles de fósforo "disponibles" en el suelo (18, 19, 27, 35, 45, 53); no ha sido, sin embargo estudiado el efecto de distintos tamaños de grano.

Al analizar estos trabajos, llama la atención que los resultados y discusiones se centran en determinar si los valores "A" variaron significativamente a causa de los tratamientos empleados, explicar las tendencias de estas variaciones y sus causas calificar,

finalmente, al valor "A" como un método adecuado si no mostró variaciones y como ineficaz si varió significativamente.

Este criterio de evaluación del valor "A" no parece ser el más adecuado pues el "fósforo disponible" del suelo no corresponde a un valor fijo, rígido, sino que por estar el concepto de "disponibilidad" asociado al crecimiento de las plantas es, por naturaleza, variable. Podría pensarse que un suelo determinado puede ofrecer una "disponibilidad potencial" de fósforo a las plantas, a la cual podría asumírsele un valor fijo pero que sería necesariamente variable al transformarse la disponibilidad "potencial" en "actual", que tomaría distintos valores dependiendo del tipo de planta, tiempo de crecimiento y cualquier factor del suelo, planta y medio ambiente en general que afecte el crecimiento de las plantas (especialmente de sus raíces).

De acuerdo a lo expuesto, el valor "A" tendría ventajas, al igual que otros métodos biológicos para la determinación del fósforo "disponible" del suelo en comparación con los métodos químicos convencionales que son incapaces de medir la variabilidad de la disponibilidad del P del suelo y más bien tienden a medir la "disponibilidad potencial" debido a lo cual es necesario calibrarlos para interpretar correctamente sus resultados en distintos suelos, y poder hacer recomendaciones de fertilizantes para distintos cultivos y condiciones de manejo (densidad y época de siembra, rotación cultural, etc.).

Para una interpretación adecuada del valor "A", entonces, no

basta con indicar su variabilidad y tendencias, sino que es necesario asociarlas con alguna medida aún más directa del fósforo "disponible" del suelo y en base a la similitud entre las variaciones y tendencias entre ambas mediciones es posible juzgar la eficiencia del valor "A".

En el caso del experimento desarrollado se dieron las condiciones para efectuar estas comparaciones pues se ha medido la absorción de fósforo del suelo por las mismas plantas con las que se determinó el valor "A" y ambas variables de respuesta han estado sujetas a las mismas fuentes de variación.

Al comparar el efecto de los tratamientos en la absorción del fósforo del suelo y en los valores "A", encontramos que, en primer lugar, los valores "A" fueron exageradamente altos; la mayor absorción de P del suelo fue de 49 mg de P_2O_5 /maceta para el final de las dos cosechas y los valores "A" variaron entre extremos de 170 a 1400 mg de P_2O_5 /maceta, también con los resultados correspondientes al total de las dos cosechas.

En las Figuras 4 y 12 se pueden comparar las tendencias finales mostradas por el fósforo del suelo y el valor "A" al ser afectados por diferentes tamaños de granos y dosis. Se observa que fue en el suelo Juray donde fueron más semejantes las tendencias de ambas variables, especialmente para el efecto de las dosis. Esto último conuerda en parte con las observaciones realizadas por Terman y Kasawneh (53) quienes han indicado que cuándo los suelos tienen niveles bajos de fósforo disponible el efecto de las dosis tiende a

aumentar los valores "A", en cambio cuando el suelo tiene niveles altos de fósforo disponible los valores "A" permanecen constantes con las dosis. Al comparar el comportamiento de los valores "A", en el suelo Juray se observa, al contrario que en el Birrisito y Colorado, que las dosis no afectaron significativamente a los valores "A"; por otra parte, si se comparan las absorciones de P del suelo en los tratamientos testigos, se observa que en el suelo Juray éstas fueron considerablemente mayores lo que sería un índice de un mayor contenido de fósforo disponible en dicho suelo; sin embargo, en el Cuadro 2, se observa que las fracciones del P soluble inorgánico fueron insignificantes (trazas) en todos los suelos pero los contenidos de fósforo total fueron muy superiores en el suelo Juray el que además parece tener relativamente saturada su "capacidad de fijación de fósforo", lo que afirmaría la observación anterior.

Como los efectos de los tratamientos en la absorción de fósforo del suelo no fueron reflejadas en el valor "A" ya que las tendencias no fueron similares y cuando se parecieron la magnitud de los cambios no fueron proporcionales, se concluye que dicho método no es eficaz al usarse en suelos "fijadores" de fósforo; debido al fenómeno de "fijación" cualquier factor que afecte la disponibilidad del fósforo del fertilizante se refleja en cambios bruscos en la relación: P derivado del suelo/P derivado del fertilizante en base a la cual se calcula el valor "A"; o sea que en los suelos "fijadores" no se cumplen los dos principios inherentes al éxito del valor "A": la cantidad de P absorbido desde el suelo fue afectada por las dosis (Cuadro

3 del Apéndice) y el por ciento de recuperación fue diferente no tan sólo con las dosis sino también según el tamaño de granos utilizado (Figura 7). Sin embargo, en la Figura 12 se observa que la granulación afectó relativamente poco a los valores "A" cuando se utilizaron granos grandes (mayores a 3 mm de diámetro) es decir, cuando se emplearon formas de menos solubilidad y además, las magnitudes de los valores fueron más bajos en tales condiciones; esto podría indicar que el valor "A" podría tener un comportamiento más adecuado en suelos fijadores si se evaluara con fertilizantes de baja solubilidad, pues, en tales condiciones la relación P del suelo/P del fertilizante serían más constantes. Además es posible que, de acuerdo a los resultados obtenidos, al aplicar dosis menos elevadas y evaluar los valores "A" en períodos de extracción más cortos se obtendrían valores "A" de magnitudes más acordes con los niveles de fósforo disponible en estos suelos ya que debido a que para el cálculo del valor "A" debe multiplicarse la relación P derivado del suelo/P derivado del fertilizante por las dosis aplicadas; si estas son muy altas y corresponden a fertilizantes de alta solubilidad (y por lo tanto susceptibles a grandes "fijaciones") se producen cifras exageradas del valor "A".

En resumen, a pesar de que los valores "A" fueron muy afectados por los tratamientos y no guardaron relación con los contenidos de fósforo absorbido del suelo, ello no significa necesariamente que deba descartársele como un método con posibilidades de aplicación en suelos fijadores, más aún si sería posible evitar, teóricamente, las

causas que limitaron su eficacia y aún si esto no fuese posible, sería un método adecuado para la determinación relativa del "fosforo disponible" en distintos suelos (por comparación) si se estandarizase la metodología para su determinación, pero en tales condiciones no tendría ventajas ante los métodos químicos convencionales que son más sencillos y no requieren de instrumentos tan especializados.

6. CONCLUSIONES

1. El aumento del diámetro de los granos favoreció la eficiencia del fosfato monocálcico en los suelos estudiados.
2. El aumento de las dosis tendió a disminuir la eficiencia del fosfato monocálcico.
3. Los granos de mayor diámetro fueron los más eficientes en el efecto residual del fosfato monocálcico.
4. La capacidad de fijación determinada en laboratorio ni las características químicas y mineralógicas de los suelos fueron suficientes para explicar el comportamiento de los distintos tamaños de grano.
5. Los tamaños "críticos" de grano correspondieron a partículas de diámetros mayores en el suelo Colorado (Latosol), fueron algo más pequeñas en el suelo Birrisito (Andosol) y menores en el suelo Juray (Aluvial).
6. Los tamaños de grano que maximizaron la eficiencia del fosfato monocálcico fueron ligeramente mayores a los que maximizaron la producción de biomasa.
7. Los principios inherentes a la aplicación exitosa del valor "A" no se cumplieron en los suelos 'fijadores de P' estudiados.

8. Los resultados obtenidos no son concluyentes para descalificar la eficacia del valor "A" y se recomienda verificar su comportamiento al determinarlo con una fuente de ^{32}P de menor solubilidad y aplicada en dosis menores a las empleadas.

9. Los resultados encontrados indican que sería posible disminuir el costo de la fertilización en los suelos estudiados al aplicar el fosfato monocálcico granulado adecuadamente, pero es necesario desarrollar experimentos para confirmar los resultados obtenidos y determinar en el terreno y para las condiciones de interés cuáles son los tamaños de grano óptimos.

7. RESUMEN

Se estudió el efecto de la granulación y dosis en la eficiencia (% de recuperación) del superfosfato concentrado y el comportamiento del valor "A" en tres suelos 'fijadores' de fósforo: Colorado (Latosol), Birrisito (Andosol) y Juray (Aluvial).

Para ello se desarrolló un experimento de invernadero en el que se provocó una extracción biológica del fósforo del fertilizante y del suelo mediante dos cosechas sucesivas de maíz (seis plantas/maceta con tres litros de suelo) de 40 días cada una. Las dosis aplicadas fueron 309,6; 619,2 y 928,8 mg de P_2O_5 /maceta y los tamaños de grano utilizados fueron <12 mallas (0,5 mm), 9-12 mallas (2 mm), 6-9 mallas (3 mm), 3-6 mallas (6 mm) y 1/2 pulgada de diámetro (12 mm). El superfosfato concentrado fue marcado con ^{32}P (0,436 mCi/g de P_2O_5).

Los resultados mostraron que el aumento del diámetro de los granos fue efectivo en aumentar la eficiencia del superfosfato concentrado, especialmente en el suelo Colorado, luego el Birrisito y por último el Juray y que los granos más grandes (12 mm) fueron los que produjeron el mayor efecto residual en los tres suelos estudiados; el aumento de las dosis tendió, en general, a disminuir la eficiencia del fertilizante. Esto indica que sería posible aumentar considerablemente la eficiencia del superfosfato concentrado en condiciones de campo si se utilizaran gránulos mayores, pero es necesario realizar experimentaciones de campo para hacer recomendaciones.

Los tamaños de grano, dosis y cosecha provocaron grandes variaciones en el valor "A" ya que en los suelos estudiados no se cumplieron los principios inherentes al éxito de esta determinación. Los resultados obtenidos no permiten concluir sobre la eficacia del valor "A" y se indican algunas modificaciones en la metodología de su evaluación que podrían mejorar su comportamiento.

8. SUMMARY

The efficiency (per cent recovery) of MCP (concentrated superphosphate) as affected by granule size and doses were studied in three phosphorus fixing soils: Colorado (Dystropept), Birrisito (Dystrandept), and Juray (Alluvial). The "A" value was also evaluated as a function of the factors studied.

Experiments were carried out in the greenhouse using corn as the indicator plant during two successive cropping (six plants/pot). The rate of phosphorus applied was 309.6, 619.2, and 928.8 mg of P_2O_5 /pot and the granule size: <12 mesh (0.5 mm), 9-12 mesh (2 mm), 6-9 mesh (3 mm), 3-6 mesh (6 mm) and 1/2 inch (12 mm) in diameter. The MCP was tagged with ^{32}P (0.436 mCi/g of P_2O_5).

The results showed that the increase in granule diameter was effective in increasing the efficiency of the MCP, especially in the Colorado soil, then in Birrisito and lastly, in Juray. The larger granules (12 mm) were the ones which produced the greater residual effect in the three soils studied; the increase in doses caused, in general, a decrease in the fertilizer's efficiency. This indicated that it would be possible to considerably increase the efficiency of the MCP under field conditions by using larger granule size. Field experiments are needed to provide data on granule size in order to make final recommendations.

The granule size, dosis and successive cropping caused great variations in the "A" value. The results obtained are insufficient

towards evaluating the efficiency of the "A" value and some modifications in the methodology of its evaluation are stated which could improve its behavior.

9. LITERATURA CITADA

1. AGUIRRE, A. V. Estudio de los suelos del área del Centro Tropical de Enseñanza e Investigación, IICA - Turrialba, Costa Rica. Tesis Mag. Sc. Turrialba, Costa Rica, IICA, 1971. 145 p. (mimeo)
2. BORNEMISZA, E. y FASSBENDER, H. W. Uptake of fertilizer phosphate from nine soils from humid tropics. *Agrochimica* 14(2-3):259-268. 1970.
3. _____ e IGUE, K. Oxidos libres de hierro y aluminio en suelos tropicales. *Turrialba* 17(1):23-30. 1967.
4. BOULDIN, D. R., DEMENT, J. D. y SAMPLE, E. C. Interaction between dicalcium and monocalcium phosphates granulated together. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 8(6):470-474. 1960.
5. _____ y SAMPLE, E. C. Calcium phosphate fertilizers: III. The effect of surface area on the availability coefficients of the dicalcium phosphates. *Soil Science Society of America Proceedings* 23(4):276-281. 1959.
6. _____ y SAMPLE, E. C. The influence of associated salts on plant response to dicalcium phosphate. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 11(3):212-214. 1963.
7. BURNS, G. R. et al. Estimation of particle-size effects of water-soluble phosphate fertilizer in various soils. *Soil Science Society of America Proceedings* 27(5):556-560. 1963.
8. DAY, P. R. y FORSYTHE, W. M. Hydrodynamic dispersion of solutes in the soil moisture stream. *Soil Science Society of America Proceedings* 21(5):477-480. 1957.
9. DEDATTA, S. K., FOX, R. L. y SHERMAN, G. D. Availability of fertilizer phosphorus in three latosols of Hawaii. *Agronomy Journal* 55(4):311-313. 1963.
10. FASSBENDER, H. W. Formas de los fosfatos en algunos suelos de la Zona Oriental de la Meseta Central y de las Llanuras Atlánticas de Costa Rica. *Fitotecnia Latinoamericana* 3(1-2):187-202. 1966.

11. FASSBENDER, H. W. La adsorción de fosfatos en suelos fuertemente ácidos y su evaluación usando la isoterma de Langmuir. Fitotecnia Latinoamericana 3(1-2):203-216. 1966.
12. _____. Phosphorus deficiency and fixation in volcanic ash soils in Central America. In Panel sobre Suelos Derivados de Cenizas Volcánicas de América Latina, Turrialba, 1969. Turrialba, IICA, 1969. pp. B.4.1-B.4.10.
13. _____. Phosphorus fixation in tropical soils. Agri Digest 18:20-28. 1969.
14. _____. Estudio del fósforo en suelos de América Central. IV. Capacidad de fijación de fósforo y su relación con características edáficas. Turrialba 19(4):497-505. 1969.
15. _____ e IGUE, K. Comparación de métodos radiométricos y colorimétricos en estudios sobre retención y transformación de fosfatos en el suelo. Turrialba 17(5):284-287. 1967.
16. _____, MÜLLER, L. y BALERDI, F. Estudio del fósforo en suelos de América Central. II. Formas y su relación con las plantas. Turrialba 18(4):333-347. 1968.
17. FIELDES, M. y PERROTT, K. W. The nature of allophane in soils. Part 3. Rapid field and laboratory test for allophane. New Zealand Journal of Science 9(3):623-629. 1966.
18. FRIED, M. "E", "L", and "A" values. In International Congress of Soil Science, 8th, Bucharest, 1964. Bucharest, House of the Academy of the Socialist Republic of Romania, 1964. v. 4, pp. 29-39.
19. _____ y DEAN, L. A. A concept concerning the measurement of available soil nutrients. Soil Science 73(4):263-271. 1952.
20. GUNARY, D., HALLOS WORTH, E. G. y CRAWFORD, D. V. The experimental study of the mobility of ions in soil with particular reference to phosphorus. In Experimental Pedology. Proceedings of the 11th Easter School of Agricultural Sciences. University of Nottingham: 149-156. 1964. (Original no consultado; compendiado en Soils and Fertilizers 28(5):433. 1965).
21. HARDY, F. y BAZAN, R. Studies in Costa Rican soils. Turrialba, Inter-American Institute of Agricultural Sciences, 1963. v. 1-3, p. irr. (mimeo)

22. HEIN, L. B. et al. Granulation of high-analysis fertilizers. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 4(4):318-330. 1956.
23. HSU, P. H. Fixation of phosphate by aluminium and iron in acids soils. *Soil Science* 99(6):398-402. 1965.
24. HUFFMAN, E. O. et al. Rates of solution of calcium phosphates in phosphoric acid solutions. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 5(4):266-275. 1957.
25. JACKSON, M. L. *Soil chemical analysis*. Englewood Cliffs, N. Y., Prentice Hall, 1958. 498 p.
26. KOMANI, N., KURIHARA, K. y MITSUI, S. Effects of placement and granulation of compound fertilizers on phosphate uptake by wheat and rice plants. *Journal of the Science of Soil and Manure (Japan)* 35(3):77-81. 1964. (Original no consultado; compendiado en *Soil Science and Plant Nutrition* 10(5):35. 1964).
27. LARSEN, S. The use of P^{32} in studies of the uptake of phosphorus by plants. *Plant and Soil* 4(1):1-10. 1952.
28. LAWTON, K. et al. Influence of particle size, water solubility, and placement of fertilizers in the nutrient value of phosphorus in mixed fertilizers. *Soil Science* 82(6):465-476. 1956.
29. _____ y COOK, R. L. Interaction between particle size and water solubility of phosphorus in mixed fertilizers as factor affecting plant availability. *Farm Chemicals* 118(4):44-46. 1955.
30. _____ y VOMOCIL, J. Dissolution and migration of phosphorus from granular superphosphate in some Michigan soils. *Soil Science Society of America Proceedings* 18(1):26-32. 1954.
31. LEHR, J. R. y BROWN, W. E. Calcium phosphate fertilizer: II. A petrographic study on their alteration in soils. *Soil Science Society of America Proceedings* 22(1):25-32. 1958.
32. _____, BROWN, W. E. y BROWN, E. H. Chemical behavior of monocalcium phosphate monohydrate in soils. *Soil Science Society of America Proceedings* 23(1):3-7. 1959.
33. LEWIS, E. T. y RACZ, G. J. Phosphorus movement in some calcareous and noncalcareous Manitoba soils. *Canadian Journal of Soil Science* 49(3):305-312. 1969.

34. LINDSAY, W. L. y STEPHENSON, H. F. Nature of the reactions of monocalcium phosphate monohydrate in soils: II. Dissolution and precipitation reactions involving iron, aluminium, manganese and calcium. Soil Science Society of America Proceedings 23(1):18-22. 1959.
35. MAKLED, F. M. y MOWELCHI, N. M. Effects of phosphate fertilizers, sampling date, and plant growth on the A value. Agrokém. Talajt. (Hung.) 17:201-206. 1968. (Original no consultado; compendiado en Soils and Fertilizers 31(1): 75. 1969).
36. MARTINI, J. A. Caracterización del estado nutricional de los principales 'latosoles' de Costa Rica, mediante la técnica del elemento faltante en el invernadero. Turrialba 19(3): 394-408. 1969.
37. MATTINGLY, G. E. y TALIBUDEEN, O. Progress in the chemistry of fertilizer and soil phosphorus. In Grayson, M. y Griffith, E. J., eds. Topics in phosphorus chemistry. New York, Interscience, 1967. v. 4, pp. 157-290.
38. MÜLLER, L. et al. Estudio del fósforo en suelos de América Central. I. Ubicación, características físicas y químicas de los suelos estudiados. Turrialba 18(4):319-332. 1968.
39. OLSEN, S. R., KEMPER, W. D. y VAN SCHAİK, S. C. Self diffusion coefficients of phosphorus in soil measured by transient and steady state methods. Soil Science Society of America Proceedings 29(2):154-158. 1965.
40. _____ y WATANABE, F. S. Diffusion of phosphorus as related to soil texture and plant uptake. Soil Science Society of America Proceedings 27(6):648-653. 1963.
41. OWENS, L. et al. Laboratory, greenhouse and field studies with mixed fertilizers varying in water-soluble phosphorus content and particle size. Soil Science Society of America Proceedings 19(3):315-319. 1955.
42. PETERBURGSKII, A. V. y DEBRETSENI, B. Availability to oats of the phosphates of compound and simple fertilizers on acid and limed soils. Jzv. timiryazev. s-Kh. Akad. 5:112-120. 1961. (Original no consultado; compendiado en Soils and Fertilizers 25(3):231. 1962).
43. PHILLIPS, R. E., PLACE, G. A. y BROWN, D. A. Self diffusion of phosphorus in clays and soils: I. The effect of phosphorus rate. Soil Science Society of America Proceedings 32(1): 41-44. 1968.

44. SAVANT, N. K., DAFTARDAR, S. Y. y KIBE, M. M. Note on lateral movement of phosphorus from coated and uncoated granulated fertilizers in soils. *Indian Journal of Agricultural Sciences* 40(1):79-80. 1970.
45. SPRATT, E. R. y RENNIE, D. A. Factors affecting and the significance of "A" values using band placement. In *Radioisotopes in Soil-Plant Nutrition Studies*, Bombay, 1962. Proceedings. Vienna, FAO/IAEA, 1962. pp. 329-342.
46. STAROSTKA, R. W., CARO, J. H. y HILL, W. L. Availability of phosphorus in granulated fertilizer. *Soil Science Society of America Proceedings* 18(1):67-71. 1954.
47. TAYLOR, A. W., GURNEY, E. L. y MORENO, E. C. Precipitation of phosphate from calcium phosphate solutions by iron oxide and aluminium hydroxide. *Soil Science Society of America Proceedings* 28(1):49-52. 1964.
48. TERMAN, G. L. y ALLEN, S. E. Fertilizer and soil P uptake by maize, as affected by soil P level, granule size, and solubility of phosphate source. *Journal of Agricultural Science* 73(3):417-424. 1969.
49. _____ et al. Crop response to NPK fertilizers varying in granule size and water solubility of the phosphorus. *Soil Science Society of America Proceedings* 20(4):551-556. 1956.
50. _____, BOULDIN, D. R. y WEBB, J. R. Crop response to phosphorus in water insoluble phosphates varying in citrate solubility and granule size. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 9(2):166-170. 1961.
51. _____, BOULDIN, D. R. y WEBB, J. R. Evaluation of fertilizers by biological methods. *Advances in Agronomy* 14:265-317. 1962.
52. _____ et al. Crop response to ammoniated superphosphate and dicalcium phosphate, as affected by granule size, water solubility and time of reaction with soil. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 8(1):13-18. 1960.
53. _____ y KHASAWNEH, F. E. Crop uptake of fertilizer and soil phosphorus in relation to calculated A values. *Soil Science* 105(5):346-354. 1968.
54. THORNE, D. W., JOHNSON, P. E. y SEATZ, L. F. Crop response to phosphorus in nitric phosphates. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 3(2):136-140. 1955.

55. URRUTIA DEL RIO, J. Reacciones de los fosfatos monocálcico monohidratado y dicálcico dihidratado en tres suelos ácidos en condiciones de laboratorio. Tesis Mag. Sc. Turrialba, Costa Rica, IICA, 1971. 60 p. (mimeo)
56. WADA, K. Reactions of phosphate with allophane and halloysite. Soil Science 87(6):325-330. 1959.
57. WEBB, J. R. y PESEK, J. T. An evaluation of phosphorus fertilizers varying in water solubility: II. Broadcast applications for corn. Soil Science Society of America Proceedings 23(5):381-384. 1959.
58. WILLIAMS, C. H. y LIPSETT, J. The effect of particle size of superphosphate on the availability of its phosphorus and sulphur to pasture plants. Australian Journal of Agricultural Research 20(2):265-278. 1969.

A P P E N D I C E

Cuadro 1. Análisis granulométrico y por ciento de C orgánico en los suelos Colorado, Birrisito y Juray*.

| Suelos | Análisis granulométrico | | | | % de C orgánico |
|-----------|-------------------------|----------------|----------|-------------|-----------------|
| | Arena gruesa (%) | Arena fina (%) | Limo (%) | Arcilla (%) | |
| Colorado | 4,9 | 0,6 | 5,5 | 89,1 | 6,24 |
| Birrisito | 20,6 | 6,3 | 12,1 | 61,0 | 7,51 |
| Juray | 3,4 | 1,0 | 31,1 | 64,5 | 4,09 |

* Datos obtenidos por Fassbender (10).

Cuadro 2. Resultados experimentales. Efecto de tamaño de granos, dosis y cosecha en: (1) la biomasa (granos de materia seca/maceta); (2) la absorción de P del suelo (mg de P_2O_5 /maceta); (3) la absorción de P del fertilizante (mg de P_2O_5 /maceta); (4) la absorción de P total (mg de P_2O_5 /maceta); (5) el % del P_2O_5 total absorbido derivado del fertilizante (%); (6) la eficiencia del superfosfato concentrado (% de recuperación = mg de P_2O_5 extraídos/mg de P_2O_5 aplicados x 100) y (7) el valor "A" (mg de P_2O_5 "disponibles"/maceta). Datos promedios de cuatro repeticiones.

| DOSIS | TRATAMIENTOS | | SUELO CLORADO | | | | | | | SUELO BIRRIGITO | | | | | | | SUELO JURAY | | | | | | |
|-----------|--------------------------|---------|---------------|------|-------|-------|------|------|------|-----------------|------|-------|-------|------|-----|------|-------------|------|-------|-------|------|-----|------|
| | Tamaño de grano (mallas) | Cosecha | (1) | (2) | (3) | (4) | (5) | (6) | (7) | (1) | (2) | (3) | (4) | (5) | (6) | (7) | (1) | (2) | (3) | (4) | (5) | (6) | (7) |
| 0 | 1 ^a | | 3,4 | 7,4 | | 7,4 | | | | 3,8 | 6,9 | | 6,9 | | | 6,9 | 14,8 | | 14,8 | | | | |
| | 2 ^a | | 4,1 | 7,8 | | 7,8 | | | | 3,3 | 6,8 | | 6,8 | | | 7,1 | 23,9 | | 23,9 | | | | |
| | final | | 7,5 | 15,2 | | 15,2 | | | | 7,6 | 13,6 | | 13,6 | | | 13,9 | 38,7 | | 38,7 | | | | |
| < 12 | 1 ^a | | 9,1 | 12,5 | 18,6 | 31,1 | 59,4 | 2,0 | 648 | 9,6 | 9,1 | 15,8 | 24,9 | 63,6 | 1,7 | 536 | 24,2 | 22,2 | 33,3 | 55,5 | 60,1 | 3,6 | 620 |
| | 2 ^a | | 4,6 | 8,2 | 1,0 | 9,1 | 10,4 | 0,1 | 7895 | 4,3 | 8,0 | 0,8 | 8,8 | 9,3 | 0,1 | 9548 | 11,9 | 26,5 | 19,1 | 45,5 | 41,7 | 2,1 | 1256 |
| | final | | 13,7 | 20,6 | 19,6 | 40,2 | 48,1 | 2,1 | 1017 | 13,9 | 17,1 | 16,6 | 33,7 | 49,4 | 1,8 | 959 | 36,1 | 48,7 | 52,4 | 101,1 | 51,8 | 5,6 | 864 |
| 9-12 | 1 ^a | | 15,2 | 14,8 | 50,3 | 65,1 | 77,3 | 5,4 | 272 | 12,7 | 7,3 | 30,3 | 37,6 | 80,5 | 3,3 | 228 | 24,8 | 15,8 | 46,0 | 61,8 | 74,6 | 4,9 | 320 |
| | 2 ^a | | 6,3 | 8,7 | 6,0 | 14,7 | 40,0 | 0,6 | 1464 | 6,0 | 6,9 | 7,7 | 14,2 | 52,3 | 0,8 | 886 | 11,8 | 17,2 | 14,5 | 31,7 | 45,7 | 1,6 | 1090 |
| | final | | 21,6 | 23,5 | 56,3 | 79,8 | 70,5 | 6,1 | 388 | 18,7 | 13,8 | 38,0 | 51,8 | 73,3 | 4,1 | 341 | 36,6 | 33,0 | 60,5 | 93,5 | 64,9 | 6,5 | 513 |
| 6-9 | 1 ^a | | 15,4 | 15,1 | 57,6 | 72,7 | 79,3 | 6,2 | 239 | 14,4 | 8,5 | 33,8 | 42,3 | 79,9 | 3,7 | 234 | 24,7 | 15,2 | 48,3 | 63,5 | 75,7 | 5,2 | 295 |
| | 2 ^a | | 8,9 | 10,0 | 13,5 | 23,5 | 55,8 | 1,4 | 709 | 7,5 | 6,5 | 12,5 | 19,1 | 65,1 | 1,3 | 499 | 12,0 | 21,9 | 15,3 | 37,1 | 42,1 | 1,6 | 1242 |
| | final | | 24,3 | 25,1 | 71,1 | 96,2 | 74,0 | 7,7 | 327 | 21,9 | 15,1 | 46,3 | 61,4 | 75,5 | 5,1 | 302 | 36,6 | 37,1 | 63,6 | 100,6 | 63,4 | 6,8 | 541 |
| 3-6 | 1 ^a | | 15,1 | 16,0 | 65,4 | 81,3 | 80,4 | 7,0 | 230 | 14,0 | 8,7 | 30,5 | 39,3 | 76,6 | 3,3 | 265 | 21,3 | 15,0 | 41,6 | 56,6 | 73,6 | 4,5 | 337 |
| | 2 ^a | | 9,7 | 8,7 | 20,9 | 29,6 | 70,3 | 2,2 | 364 | 10,4 | 9,7 | 19,4 | 29,1 | 66,1 | 2,1 | 460 | 11,3 | 18,9 | 15,0 | 33,8 | 45,0 | 1,6 | 1148 |
| | final | | 25,1 | 24,6 | 85,4 | 110,9 | 76,7 | 9,3 | 272 | 24,4 | 18,4 | 50,0 | 68,4 | 73,0 | 5,1 | 346 | 32,4 | 34,0 | 56,6 | 90,4 | 62,9 | 6,1 | 593 |
| 1/2 pulg. | 1 ^a | | 11,0 | 12,4 | 60,6 | 73,0 | 82,7 | 6,4 | 198 | 9,6 | 12,8 | 20,2 | 38,9 | 67,3 | 2,9 | 382 | 17,2 | 14,6 | 34,3 | 48,9 | 69,5 | 3,7 | 411 |
| | 2 ^a | | 12,5 | 6,7 | 44,8 | 51,5 | 86,7 | 4,6 | 139 | 7,5 | 6,3 | 20,3 | 26,6 | 70,9 | 2,2 | 382 | 16,4 | 14,1 | 23,3 | 37,4 | 62,0 | 2,5 | 557 |
| | final | | 23,6 | 19,1 | 105,4 | 128,8 | 81,7 | 11,0 | 121 | 17,1 | 19,1 | 46,5 | 65,6 | 71,1 | 5,2 | 372 | 33,6 | 28,7 | 57,6 | 86,3 | 66,4 | 6,2 | 466 |
| < 12 | 1 ^a | | 15,3 | 22,5 | 52,0 | 74,5 | 69,7 | 2,8 | 813 | 15,5 | 12,1 | 46,0 | 58,1 | 79,4 | 2,5 | 488 | 31,2 | 25,6 | 72,0 | 97,6 | 73,9 | 3,9 | 664 |
| | 2 ^a | | 7,4 | 10,8 | 7,6 | 18,2 | 39,6 | 0,4 | 2823 | 5,2 | 8,4 | 3,1 | 11,6 | 26,6 | 0,2 | 9120 | 14,6 | 21,1 | 20,7 | 41,8 | 49,9 | 1,1 | 1820 |
| | final | | 22,8 | 33,3 | 59,3 | 92,7 | 63,8 | 3,2 | 1059 | 20,8 | 20,5 | 49,2 | 73,1 | 70,7 | 2,6 | 780 | 46,7 | 46,7 | 92,7 | 139,4 | 66,8 | 5,0 | 929 |
| 9-12 | 1 ^a | | 19,6 | 19,9 | 87,9 | 107,7 | 81,5 | 4,7 | 420 | 19,5 | 10,3 | 62,9 | 73,2 | 85,9 | 3,4 | 306 | 30,0 | 17,5 | 86,7 | 104,1 | 83,2 | 4,7 | 381 |
| | 2 ^a | | 14,8 | 12,5 | 31,2 | 43,7 | 71,6 | 1,7 | 707 | 9,3 | 7,3 | 15,4 | 22,7 | 67,9 | 0,8 | 866 | 17,3 | 23,4 | 30,8 | 54,2 | 58,5 | 1,7 | 1389 |
| | final | | 34,4 | 32,4 | 119,1 | 151,5 | 78,6 | 6,4 | 506 | 28,8 | 17,6 | 78,4 | 96,0 | 81,6 | 4,2 | 423 | 47,3 | 40,9 | 117,5 | 158,3 | 74,5 | 6,3 | 645 |
| 6-9 | 1 ^a | | 19,4 | 31,0 | 105,4 | 136,5 | 77,3 | 5,7 | 543 | 19,4 | 6,8 | 62,0 | 68,7 | 88,2 | 3,3 | 246 | 28,7 | 18,0 | 92,1 | 110,2 | 86,0 | 5,0 | 376 |
| | 2 ^a | | 17,2 | 17,9 | 46,8 | 64,7 | 73,0 | 2,5 | 657 | 12,5 | 10,0 | 22,2 | 32,2 | 68,6 | 1,2 | 845 | 17,3 | 16,8 | 31,5 | 48,2 | 65,3 | 1,7 | 940 |
| | final | | 36,6 | 48,9 | 152,2 | 201,1 | 76,4 | 8,2 | 540 | 31,9 | 16,8 | 84,1 | 100,9 | 82,0 | 4,5 | 409 | 46,0 | 34,8 | 123,6 | 158,4 | 78,0 | 6,7 | 529 |
| 3-6 | 1 ^a | | 19,4 | 28,6 | 126,5 | 155,1 | 81,8 | 6,8 | 523 | 19,2 | 7,1 | 52,9 | 60,1 | 88,0 | 2,8 | 251 | 28,1 | 15,6 | 76,7 | 92,3 | 82,6 | 4,1 | 390 |
| | 2 ^a | | 18,5 | 11,1 | 57,6 | 68,7 | 83,8 | 3,1 | 333 | 15,8 | 12,9 | 34,5 | 47,4 | 72,8 | 1,8 | 681 | 14,4 | 12,1 | 27,0 | 39,1 | 68,9 | 1,4 | 819 |
| | final | | 37,9 | 39,7 | 184,1 | 223,8 | 82,4 | 9,9 | 395 | 35,0 | 20,0 | 87,4 | 107,4 | 81,3 | 4,7 | 427 | 42,4 | 27,7 | 103,7 | 131,4 | 78,7 | 5,6 | 506 |
| 1/2 pulg. | 1 ^a | | 15,2 | 24,6 | 115,6 | 140,2 | 82,4 | 6,2 | 397 | 12,2 | 7,0 | 48,6 | 59,6 | 87,5 | 2,6 | 264 | 20,2 | 11,7 | 59,8 | 71,5 | 83,6 | 3,2 | 357 |
| | 2 ^a | | 9,7 | 5,1 | 57,5 | 62,8 | 91,4 | 3,1 | 162 | 11,3 | 8,7 | 34,2 | 42,9 | 79,6 | 1,8 | 470 | 16,7 | 19,4 | 38,1 | 57,6 | 65,9 | 2,0 | 960 |
| | final | | 24,9 | 32,1 | 173,1 | 203,0 | 85,2 | 9,3 | 351 | 23,5 | 15,7 | 82,8 | 98,5 | 84,1 | 4,4 | 354 | 36,8 | 31,1 | 98,0 | 129,0 | 75,9 | 5,2 | 603 |
| < 12 | 1 ^a | | 16,8 | 22,2 | 53,9 | 76,1 | 70,7 | 1,9 | 1136 | 19,0 | 14,5 | 55,3 | 69,8 | 79,1 | 2,0 | 738 | 30,8 | 11,8 | 104,4 | 116,2 | 89,9 | 5,2 | 313 |
| | 2 ^a | | 10,7 | 13,3 | 15,6 | 29,1 | 54,1 | 0,6 | 2323 | 7,6 | 10,0 | 8,6 | 18,7 | 46,6 | 0,3 | 3208 | 19,3 | 20,0 | 33,7 | 53,7 | 62,5 | 1,2 | 1631 |
| | final | | 27,5 | 35,5 | 69,7 | 105,1 | 65,6 | 2,5 | 1456 | 26,7 | 24,6 | 63,9 | 88,5 | 72,3 | 2,3 | 1063 | 50,1 | 31,8 | 138,1 | 169,9 | 81,1 | 6,4 | 655 |
| 9-12 | 1 ^a | | 18,3 | 18,6 | 93,2 | 111,8 | 83,4 | 3,3 | 557 | 19,4 | 9,7 | 72,0 | 81,8 | 88,2 | 2,6 | 383 | 29,0 | 10,0 | 110,9 | 120,1 | 91,7 | 5,9 | 244 |
| | 2 ^a | | 17,8 | 10,3 | 44,0 | 54,3 | 81,5 | 1,6 | 619 | 10,9 | 7,8 | 23,9 | 31,7 | 75,2 | 0,9 | 889 | 19,2 | 13,4 | 42,6 | 56,1 | 76,0 | 1,5 | 856 |
| | final | | 36,2 | 28,9 | 137,2 | 166,1 | 82,7 | 4,9 | 578 | 30,3 | 17,4 | 95,9 | 113,5 | 84,5 | 3,4 | 508 | 48,2 | 23,4 | 153,5 | 177,0 | 86,7 | 7,5 | 425 |
| 6-9 | 1 ^a | | 21,2 | 29,8 | 122,9 | 152,7 | 80,5 | 4,4 | 676 | 21,7 | 7,4 | 74,3 | 81,6 | 90,9 | 2,7 | 244 | 31,5 | 25,0 | 106,1 | 131,1 | 83,4 | 5,7 | 669 |
| | 2 ^a | | 20,6 | 11,6 | 59,1 | 70,7 | 83,6 | 2,1 | 519 | 15,9 | 11,1 | 30,2 | 41,3 | 73,3 | 1,1 | 990 | 18,6 | 13,8 | 37,0 | 50,8 | 72,5 | 1,3 | 1012 |
| | final | | 41,8 | 41,5 | 182,0 | 223,4 | 81,5 | 6,5 | 634 | 37,6 | 18,4 | 104,5 | 122,9 | 85,0 | 3,7 | 488 | 50,1 | 38,8 | 143,0 | 181,8 | 78,6 | 7,0 | 766 |
| 3-6 | 1 ^a | | 20,1 | 27,2 | 138,0 | 165,2 | 83,6 | 4,9 | 550 | 21,9 | 10,6 | 78,7 | 89,3 | 87,9 | 2,8 | 355 | 28,8 | 13,8 | 84,6 | 98,4 | 85,7 | 4,5 | 481 |
| | 2 ^a | | 20,6 | 12,8 | 69,8 | 82,6 | 84,7 | 2,5 | 490 | 15,7 | 11,3 | 36,5 | 47,8 | 76,2 | 1,3 | 867 | 18,4 | 11,7 | 43,0 | 54,8 | 77,2 | 1,5 | 824 |
| | final | | 40,7 | 40,0 | 207,8 | 247,8 | 83,9 | 7,5 | 529 | 37,5 | 21,9 | 115,2 | 137,1 | 83,9 | 4,1 | 557 | 47,2 | 25,6 | 127,6 | 153,2 | 83,2 | 6,1 | 564 |
| 1/2 pulg. | 1 ^a | | 19,7 | 23,5 | 125,2 | 148,7 | 84,2 | 4,5 | 518 | 15,2 | 10,9 | 53,0 | 63,9 | 83,0 | 1,9 | 562 | 27,1 | 14,0 | 60,0 | 74,0 | 81,2 | 2,1 | 642 |
| | 2 ^a | | 13,4 | 11,7 | 67,7 | 79,4 | 84,7 | 2,4 | 491 | 11,2 | 9,3 | 41,4 | 50,7 | 81,8 | 1,5 | 620 | 17,6 | 12,1 | 35,9 | 48,0 | 74,2 | 1,3 | 957 |
| | final | | 33,1 | 35,2 | 192,9 | 228,1 | 85,4 | 6,9 | 514 | 26,4 | 20,3 | 94,4 | 114,7 | 82,4 | 3,4 | 590 | 44,7 | 26,1 | 95,9 | 122,0 | 78,6 | 3,4 | 707 |

928,8 mg de P_2O_5 /maceta

1857,6 mg de P_2O_5 /maceta

2786,4 mg de P_2O_5 /maceta

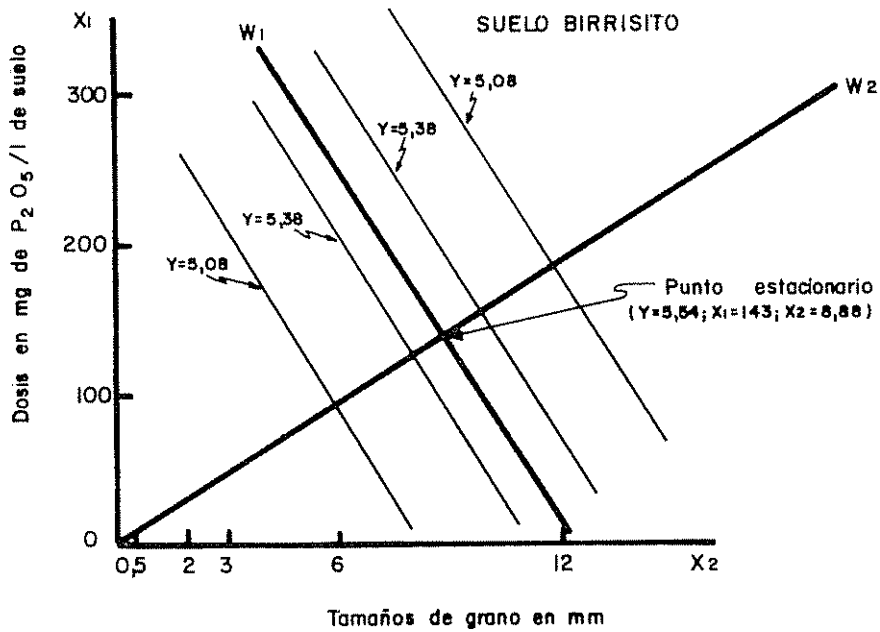
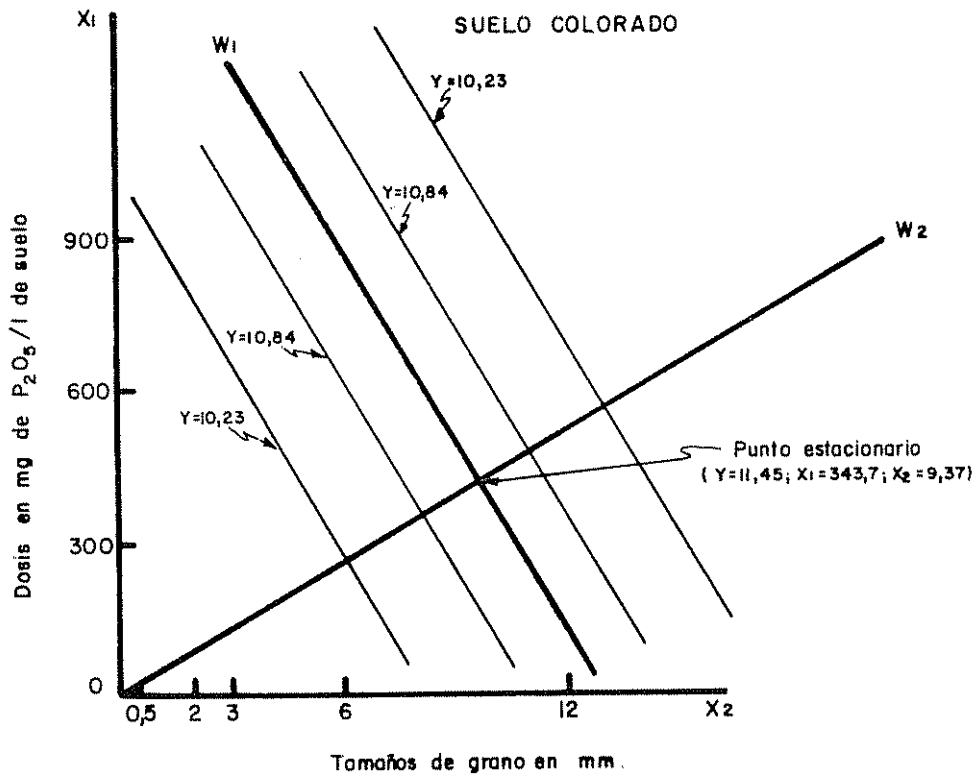


Fig 1 Isocant de eficiencia final para los suelos Colorado y Birrisito

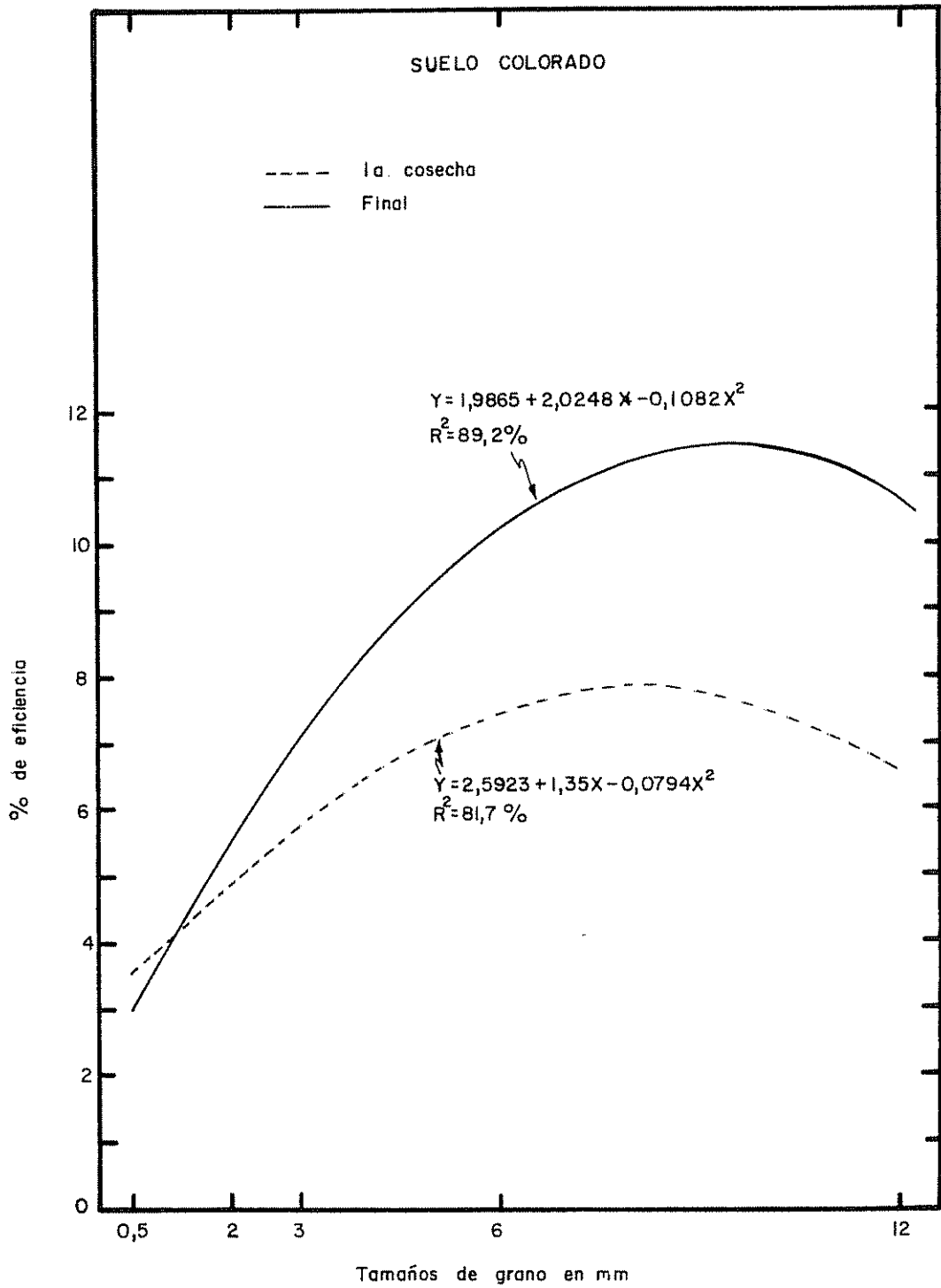


Fig 2 Curvas de respuesta de la eficiencia en función del tamaño de granos

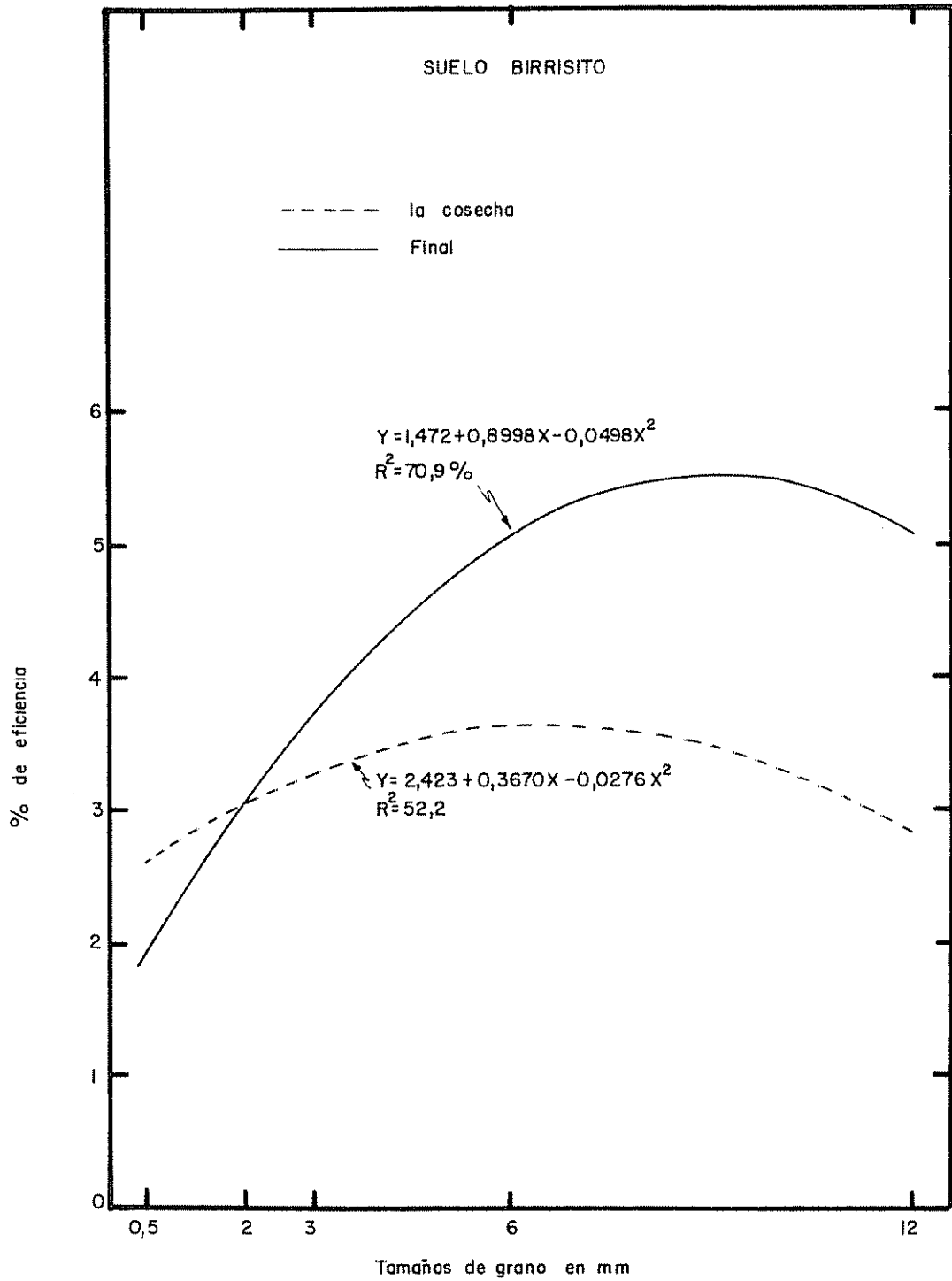


Fig.3 Curvas de respuesta de la eficiencia en función del tamaño de granos