EFECTO DEL ENCALADO SOBRE LAS FORMAS Y DISPONIBILIDAD DEL FOSFORO EN SEIS SUELOS DE COSTA RICA

Tesis de Grado de Magister Scientiae

Roberto Molina Castro

INSTITUTO INTERAMERICANO DE CIENCIAS AGRICOLAS DE LA OEA
Centro de Enseñanza e Investigación
Turrialba, Costa Rica
Octubre, 1969

EFECTO DEL ENCALADO SOBRE LAS FORMAS Y DISPONIBILIDAD DEL FOSFORO EN SEIS SUELOS DE COSTA RICA

Tesis

Sometida al Consejo de Estudios Graduados como requisito parcial para optar al grado de

Magister Scientiae

en el

Instituto Interamericano de Ciencias Agrícolas de la O. E. A.

APROBADA: _____ **Consejero**
Hans W. Fassbender, Ph. D.

_____ **Comité**
Ludwig E. Müller, Ph. D.

_____ **Comité**
Gilberto Páez, Ph. D.

_____ **Comité**
Fausto Maldonado, Ing. Agr.

Octubre, 1969

A los míos

AGRADECIMIENTOS

El autor se complace en dejar constancia de su agradecimiento:

Al Dr. Hans W. Fassbender, Consejero Principal, por su constante y estrecha orientación.

A los miembros del Comité Consejero: Dr. Ludwig E. Müller, Dr. Gilberto Páez, Dr. Elemer Bornemisza e Ing. Agr. Fausto Maldonado.

Al Sr. Alfredo Picado y demás personal de los laboratorios de Suelos y de Fisiología Vegetal.

A la Universidad de El Salvador.

A la Zona Norte del Instituto Interamericano de Ciencias Agrícolas de la OEA.

BIOGRAFIA

El autor nació en la ciudad de Santa Ana, El Salvador, en el año de 1934.

Realizó sus estudios de nivel medio en el Instituto Nacional de Occidente, graduándose de Bachiller en Ciencias y Letras en 1951.

Sus estudios universitarios los llevó en la Escuela de Ingeniería Agronómica de la Universidad de El Salvador; ingresó en 1952, egresó en 1956, y se graduó de Ingeniero Agrónomo en febrero de 1967.

Desde 1958 hasta 1962 prestó sus servicios como Tecnólogo en Suelos de la Sección de Suelos del Servicio Cooperativo Agrícola Salvadoreño Americano del Ministerio de Agricultura.

De 1965 a 1967 desempeñó el cargo de Profesor Asociado del Departamento de Suelos de la Facultad de Ciencias Agronómicas de la Universidad de El Salvador.

En setiembre de 1967 ingresó a la Escuela para Graduados del Instituto Interamericano de Ciencias Agrícolas de la OEA, donde realizó sus estudios de postgrado y obtuvo el grado de Magister Scientiae en octubre de 1969.

Actualmente es Decano de la Facultad de Ciencias Agronómicas de la Universidad de El Salvador.

CONTENIDO

LISTA DE CUADROS

I. INTRODUCCION

Las experiencias con encalado son muy antiguas, especialmente en las zonas de clima templado. Los efectos benéficos encontrados de estas prácticas agrícolas han sido considerables. En primer lugar, se le atribuye al encalado una elevación del pH del suelo, eliminando o disminuyendo los efectos detrimentales de la acidez. En segundo lugar, se considera la mayor y más adecuada adición de los nutrimentos calcio y magnesio, que están en contenidos deficitarios, debido a la absorción por las plantas y a la lixiviación, en la mayoría de los suelos ácidos. Asímismo, se considera que estas adiciones llegan a establecer adecuadas relaciones con otros nutrimentos del suelo, con los cuales existen interacciones.

A juzgar por el efecto del encalado en el pH del suelo, se le atribuye un aumento de la disponibilidad del fósforo para las plantas. Ese efecto positivo para la producción vegetal, adquiere mayor importancia si se considera, por una parte, el bajo contenido de fósforo en la mayoría de los suelos y, por otra, el hecho de que la solubilidad del fósforo en el suelo es óptima únicamente entre estrechos límites de la escala de valores de pH.

Relativamente pocos son los trabajos sobre el encalado en los trópicos y más aún los establecidos dentro de las latitudes del área centroamericana. Una evaluación más realística de esta práctica, principalmente lo concerniente a su efecto sobre el fósforo del suelo es necesaria y urgente.

El objetivo del presente trabajo consiste en estudiar el efecto del encalado en las formas, solubilidad y fijación del fósforo y su absorción por las plantas. Evaluar a través del encalado y el P del suelo, las relaciones suelo-planta por medio de parámetros físico-químicos de intensidad y capacidad en algunos suelos.

II. REVISION DE LITERATURA

La práctica del encalado data de tiempos remotos, ya que se usaba desde hace unos 200 años A.C. En nuestro tiempo ha alcanzado nuevas proyecciones debido al desenvolvimiento de los estudios de la acidez del suelo (4).

El encalado, o sea la incorporación al suelo de carbonatos, hidróxidos y óxidos de calcio y magnesio, se ha empleado en las regiones de clima templado con el doble propósito de proporcionar Ca y Mg a las plantas, y de controlar los efectos negativos de la acidez.

Venema (51), Greene (24), y Tricanico (50) han informado que los resultados del encalado en suelos de los trópicos, a diferencia de las zonas templadas, ha dado usualmente resultados poco satisfactorios y opinan que la práctica del encalado en suelos de los trópicos debe ser reconsiderada. Recientemente han sido publicadas otras revisiones de literatura sobre los diferentes aspectos del encalado (34, 37, 51).

A. Efectos del encalado sobre las formas del fósforo.

1. Formas del fósforo en el suelo.

Algunos autores (6, 15, 49) consideran dos grandes fracciones de fosfatos en el suelo: la inorgánica y la orgánica. Estas formas tienen su importancia debido que a partir de ellas se tiene una mayor o menor disponibilidad del fósforo para las plantas.

Haas (25) establece que la distribución y la proporción de diferentes formas de P en el suelo es característica para cada tipo de suelo. Por su parte Serbanesen et al. (44) consideran necesaria la apreciación cualitativa y cuantitativa de las formas de fósforo, tanto para una mejor caracterización de los diferentes tipos de suelos como para ver las posibilidades de dirigir los fenómenos de solubilización y de fijación de los fosfatos.

Muchos autores (13, 15, 25, 44) coinciden en que el método de Chang y Jackson (11) para fraccionamiento de los fosfatos inorgánicos es de gran utilidad para la caracterización de los suelos en general y para el conocimiento del estado del fósforo inorgánico en los mismos.

Entre los fosfatos inorgánicos se diferencian formas químicamente bien definidas de otras no bien definidas. Dentro de las primeras formas tenemos: los fosfatos cálcicos anhidros e hidratados, apatitos hidroxidados, carbonatados o fluorados; fosfatos de aluminio y fosfatos de hierro. Se encuentran dentro de éstos además algunos fosfatos complejos. En las formas no bien definidas se encuentran formas cristalinas y amorfas como fosfatos adsorbidos a la fracción coloidal, orgánica e inorgánica, y como fosfatos ocluidos en hidróxido de Al, Fe y Mg, (15).

La fuente original de la mayor parte del fósforo inorgánico es el grupo mineral de los apatitos. Esta forma tiende a disminuir paulativamente, tanto por la meteorización y el suelo se vuelve más ácido. El contenido de fosfatos de hierro y de aluminio aumenta por que son más estables bajo condicionesácidas (41).

Los fosfatos de Fe y Al son menos solubles a pH 4,0. Su solubilidad se incrementa al incrementar el pH. Los fosfatos de calcio comienzan a formarse alrededor de un pH de 6,0. Su solubilidad decrece conforme el pH aumenta alrededor de 7,5. La disponibilidad alcanza su máximo entre los límites de pH de 6,5 y 7,0 (41)

Según Chang y Jackson (11) los fosfatos de aluminio, hierro y calcio determinados con el procedimiento propuesto por ellos también pueden incluir fosfatos adsorbidos y precipitados superficialmente, asociados con el respectivo tipo de partículas del suelo.

Aparentemente, la disponibilidad del P del suelo depende de la cantidad de fosfatos adsorbidos superficialmente en los coloides del suelo y de la solubilidad de los compuestos fosfatados cristalinos (11).

Morillo (39) trabajando con suelos de Honduras considera que el pH fue el principal factor que se relacionaba con las diferentes fracciones de P inorgánico. Este autor encontró en su estudio que el contenido de fosfatos cálcicos correlacionaron significativamente y en forma directa con el pH de los suelos, siendo también significativas las correlaciones entre el pH y los fosfatos de hierro y aluminio; pero en estos casos fueron negativas.

La fracción de fosfatos orgánicos se considera subdividida en cinco grupos principales de compuestos fosforados. Estos son: 1) fosfolípidos; 2) ácidos nucléicos; 3) fosfatos metabólicos; 4) fosfo-proteínas; 5) fosfatos de inositol. De todos estos el último grupo es importante, ya que representa más del 50 Porciento del P orgánico del suelo (9).

Algunos estudios previos (5, 7) sobre el P orgánico sugieren que el P orgánico de la materia orgánica de los suelos guarda una cierta relación con el C y el N de la misma. Trabajos más recientes (5) indican que el P contenido en la materia orgánica de los suelos es muy variable, llegando a tener valores de porcentajes desde 2,6 a 75,0 de P orgánico en el P total. Con respecto a esto Bernemisza (9) considera que los altos valores de porcentaje de P orgánico se deben más al bajo contenido de P total en los suelos; sinembargo, hace ver que esta fracción es de gran importancia ya que, en cierto grado, es directamente disponible.

Recientemente el producto de solubilidad de los fosfatos ha sido uno de los principios reconocidos en la formación de los diferentes fosfatos del suelo (29).

Con base en los productos de solubilidad de los fosfatos presentes en el suelo se han derivado los parámetros de intensidad de los fosfatos, los cuales se utilizan para su identificación y descripción parcial de su disponibilidad (18).

Fassbender (18) indicó que los iniciadores en esta nueva metodología han sido Aslyng, Clark y Peech, y Schofield. Dichos autores han derivado los parámetros del potencial fosfato monocálcico (pH_2PO_4- 0,5 p Ca) y del potencial cálcico (pH - 0,5 p Ca), estableciendo relaciones entre los diferentes fosfatos cálcicos.

Para la identificación de los fosfatos de calcio del suelo, Aslyng (2) propuso un diagrama que representa sus correspondientes isotermas de solubilidad. Por su parte, Lindsay y Moreno (36) presentan un diagrama de la solubilidad de los fosfatos del suelo como una función del pH_2PO_4 y el pH.

Ulrich y Khanna (53) propusieron otro diagrama para la solubilidad de los fosfatos del suelo. La solubilidad de los fosfatos la expresan en función del potencial del ácido fosfórico. En este diagrama, la transición del potencial cálcico (pH - 0,5 p Ca), al potencial alumínico (pH - 0,33 p Al), la establecen por medio de la correlación de estos dos parámetros al analizar un gran número de suelos.

Fassbender (18) presenta las relaciones encontradas por varios autores para los diferentes fosfatos, éstos son:

a) $pH + pH_2PO_4 = 2(pH - 0,5\ p\ Ca) - 0,53$ para el fosfato dicálcico.

b) $pH + pH_2PO_4 = 8/3\ (pH - 0,5\ p\ Ca) - 3,26$ para el fosfato octocálcico.

c) $pH + pH_2PO_4 = 10/3\ (pH - 0,5\ p\ Ca) - 4,73$ para la apatita hidroxidada.

d) $pH + pH_2PO_4 = 3\ (pH - 0,33\ p\ Al) + 2,50$ para el fosfato Alumínico.

e) $pH + pH_2PO_4 = 3\ (pH - 0,33\ p\ Al) + 0,50$ para el fosfato Alumínico amorfo.

Fassbender y Fassbender et al. (18,20) utilizando los diferentes diagramas de solubilidad, en suelos de América Central, consideran que dió mejores resultados el diagrama de Ulrich y Khanna.

2. Efecto del encalado en las formas inorgánicas.

Fox et al. (22) trabajando con suelos ácidos de Hawaii encontraron diferentes respuestas al encalado. Así en el suelo Hilo (Hydrol Humic Latosol), el fósforo extraíble fue incrementado por el encalado.

Taylor, Gurney y Lindsay (47) aplicando diferentes formas de fosfatos encontraron que el encalado resultó en una mayor absorción de fósforo por el maíz (Zea mays) en cada una de las formas adicionadas, que en los tratamientos sin el encalado. Por otra parte, encontraron que el encalado con tres meses de incubación fue menos efectivo que el encalado sin incubación en el aprovechamiento de las formas adicionadas; sólo en la taranakita potásica fue diferente y de mayor remoción.

Fiskell y Spencer (21) estudiaron la naturaleza de los fosfatos acumulados después de 6 años de fuertes aplicaciones de triple superfosfato y roca calcítica. Para determinar las formas de P acumulado usaron análisis por medio de disolución selectiva. El P nativo estaba principalmente en forma de fosfato de hierro y en menor escala tenía fosfatos de Al y Ca. En la más baja dosis de triple superfosfato (TSP) sin encalado, el P que se acumuló fue como fosfato de aluminio, con menores cantidades de fosfato dicálcico dihidratado, fosfato de Fe, octocálcico y apatito hidroxidado. El tratamiento encalado con la más baja dosis de TSP dió como resultado la formación del 50 Porciento de fosfato de aluminio del total aplicado, el resto como fosfato de hierro y calcio. En la dosis como fosfato de aluminio,

13 Porciento en forma de fosfato de hierro, 6 Porciento como fosfato dicálcico dihidratado, 4 Porciento como fosfato octocálcico y apatito hidroxidado y el resto probablemente como P ocluido. En cambio, en la dosis media de TSP y con encalado, la acumulación de P fue en la siguiente forma: 47 Porciento fosfato de aluminio, 25 Porciento fosfato de hierro, 12 Porciento fosfato dicálcico dihidratado (F D D) y 19 Porciento como octocálcico y apatito hidroxidado. En el tratamiento con la más alta dosis de TSP sin encalado, 66 Porciento del P acumulado fue en forma de fosfato de aluminio, 17 Porciento de fosfato de hierro, 11 Porciento como FDD y 6 Porciento como fosfato octocálcico e hidroxiapatita. En cambio, en el tratamiento con la misma cantidad de TSP más encalado la acumulación de P fue de 35 Porciento para fosfato de aluminio, 7 Porciento de fosfato de hierro, 12 Porciento como FDD, y 4 Porciento como fosfato octocálcico y apatito hidroxidado.

Chang y Jackson (12) han opinado que la formación de las varias formas químicas de los fosfatos del suelo está aparentemente relacionada a los factores del suelo, tales como pH, actividad de varios cationes, producto de solubilidad de los fosfatos, grado de meteorización química y fertilización.

Estos mismos autores (12) trabajando con un suelo podzólico de pH muy bajo encontraron que el encalado tenía muy poco efecto sobre la relativa abundancia de las formas nativas de fósforo en el suelo sin fertilizante. En cambio, la aplicación de fertilizantes fosfatados solubles incrementó considerablemente las cantidades de fosfatos de aluminio y de hierro en los tres niveles de encalado; el incremento del fosfato de calcio fue pequeño en

el más alto nivel de encalado. Los fosfatos de hierro solubles en reductante no fueron afectados por el encalado o fertiliza-- ción.

Fassbender (19) determinó en un andosol de Costa Rica, que con aumento de la dosis de encalado disminuyó la acidez del suelo, aunque la variación mayor de la dosis (8 meq. Ca + Mg) produjo sólo un aumento del pH de 4,3 a 5,2. En el mismo estudio no se encontró variación significativa de los fosfatos de aluminio y de hierro con el aumento de la dosis de cal, obteniendo únicamente un ligero aumento para los fosfatos de calcio.

Recientemente, Murrmann y Peech (40) han estudiado el efecto de la adición de compuestos fosfatados cristalinos en suelos ácidos y en suelos encalados sobre la cantidad de fosfato lábil, determinado por intercambio isotópico y sobre la concentración de fosfatos en la solución. La adición de apatito hidroxidado a los suelos ácidos o la adición de variscita y estrengita a suelos encalados, incrementó ligeramente las cantidades de fosfato lábil y fosfato soluble aún después de 2 meses, lo que demustra el grado extremadamente bajo de disolución de estos compuestos. Estos autores (40), consideran que no obstante que la variscita en suelos ácidos y apatito fluorado en suelos encalados con los últimos productos de la reacción de los fosfatos aplicados, es el fosfato lábil más que los fosfatos cristalinos el que determina la concentración de equilibrio del fosfato en la solución del suelo y el grado en el cual esta concentración es mantenida, después del lavado o remoción de fosfatos por las plantas.

3. Efecto del encalado en las formas orgánicas.

Los microorganismos del suelo mineralizan el fósforo orgánico a fósforo inorgánico. Este proceso es óptimo en condiciones ligeramente ácidas y por ello las cantidades de fósforo orgánico tienden a ser mayores en suelos ácidos que en suelos alcalinos (41)

Además de los efectos directos sobre el estado químico de los elementos inorgánicos, la acidez del suelo altera la población y actividad de los microorganismos responsables de las transformaciones que envuelven al N, S, y P del suelo, esto afecta indirectamente la disponibilidad de estos elementos para las plantas (31). Lo anterior concuerda con los resultados obtenidos por Halstead et al. (26), en que el encalado de suelos ácidos de Canadá disminuyó en un 3,6 Porciento el P orgánico total, obteniendo paralelamente incrementos de 2,6 a 5,1 Porciento de P inorgánico soluble en ácidos. En forma parcial, la fracción de P orgánico soluble en Na H CO_3 disminuyó en un 46,4 Porciento.

Lawton y Davis (35) encontraron que en un suelo orgánico el encalado disminuia drásticamente el P absorbido por las plantas de frijol, pasto sudan, y maíz. Consideran estos autores que una posibilidad es que el encalado incrementó la relación HPO_4^{--} + $H_2PO_4^-$ en la solución, lo cual redujo la absorción de P. Opinaron también que el gran incremento en la actividad biológica pudo haber inmovilizado el P del suelo.

Awan (3) encontró que el encalado en suelos ácidos liberaba el P orgánico e incrementaba la eficiencia de los fosfatos aplicados. Sin embargo, Fassbender (19) no encontró cambios

significativos como efecto del encalado en la mineralización del P orgánico del suelo.

B. Efectos del encalado en la fijación del fósforo.

1. Fijación del fósforo en el suelo.

La fijación del fósforo generalmente implica la conversión del fósforo aplicado a formas relativamente insolubles (43).

Según Sauchelli (43) los químicos de suelos han desarrollado diferentes conceptos de la fijación de fosfatos en su intento para racionalizar observaciones hechas por agrónomos; estos conceptos se pueden agrupar así:

a) Fosfatos que son consumidos por los microorganismos del suelo.

b) Fosfatos precipitados por cationes solubles en la solución del suelo.

c) Fosfatos adsorbidos por los coloides.

Hemwall (29) considera que de esas tres clases de fijación, la fracción tomada por los microorganismos o fijación biológica es relativamente menor y que los que juegan mayor papel son la precipitación química y la adsorción físico-química.

La fijación de fósforo en los suelos puede ocurrir bajo condiciones de alcalinidad y acidez. En rango ácido, la fijación puede ser convenientemente dividida dentro de la precipitación de fosfatos solubles de Ca, Al y Fe, y la adsorción por coloides (29).

Los óxidos de Fe y Al, y sus hidróxidos han sido reconocidos como los que juegan un importante papel en la fijación de P (29).

Hemwall (29) cita el trabajo de Kittrick y Jackson, quienes por medio del microscopio electrónico pudieron observar el fósforo en contacto con la superficie de los óxidos de Fe y Al, con el tiempo se forma un hidroxifosfato de Al y Fe; esto les indicó que un mecanismo de "solución -precipitación" opera en la fijación.

Hemwall (29) opina que la fijación de P puede ser explicada sobre la base del principio del producto de solubilidad. Sin embargo, explica, estos resultados no excluyen la posibilidad de que los compuestos formados también puedan ser adsorbidos por la fracción inorgánica coloidal del suelo por medio de las fuerzas de Van der Waals. El producto de solubilidad en ambos casos, precipitados o adsorbidos, puede ser esencialmente el mismo.

Anota asímismo este autor (29) que es probable que el aluminio sobre y dentro de las arcillas sea el responsable de la fijación del fósforo, dando crédito a Coleman como el primero en postular la idea de que la fijación de P por arcillas es debida al contenido de Al y no a la arcilla misma, encontrándose una proporcionalidad entre el P fijado por arcillas y la cantidad de óxidos de Al sobre ellas.

Al respecto Hemwall (29) concluye que la fijación de P en suelos ácidos se debe primariamente a la formación de compuestos de aluminio y hierro. La formación de estos compuestos es gobernada por los principios del producto de solubilidad, del efecto del ion común y del efecto de las sales. En cambio, la fijación de P en suelos alcalinos y calcáreos se atribuye generalmente a

la formación de compuestos de fosfatos de calcio, aunque cierta fijación puede también deberse a compuestos de Al y Fe.

Fried y Dean (23) al estudiar la fijación del P, obtuvieron resultados que indicaban que ésta se efectuaba por sistemas que comprenden el intercambio de PO_4^{3-} de la solución, con iones sobre la superficie de las partículas del suelo. Este sistema comprendía también la participación de los hidróxidos de Fe y Al.

Haseman y colaboradores (28) encontraron que el grado de fijación por las arcillas montmorilonitas, ilitas, y caolinitas, incrementaba con elevación de la temperatura, con aumentos en la concentración de fosfatos y con disminución del pH. En cambio, el grado de fijación por los hidróxidos, gibsita, y goetita, se incrementó con la elevación de la temperatura y fue poco afectado por la variación del pH. El orden decreciente en el cual los minerales fijaron fosfatos fue: gibsita, goetita, ilita, caolinita, montmorilonita.

Jacobs (32) al estudiar los aspectos de la adsorción de los aniones fosfóricos por la superficie de la hematita (α Fe_2O_3), establece que la variación de las cargas en este óxido debidas a la transferencia de iones H^+ y OH^- , se aplica en general a todo óxido y se distingue únicamente por el pH al punto de carga nula. Este pH depende de la característica más o menos ácida o básica de la superficie de cada óxido. En cierta forma esta característica está dependiendo del poder polarizante del catión presente.

Asímismo, este autor (32) considera que en los minerales arcillosos las cargas existen en las aristas laterales, por lo cual

las arcillas pueden incluírse dentro de estos fenómenos de hidratación y transferencia de cargas.

Adams y Pearson (1) consideran que las reacciones químicas a altos valores de pH, que resultan en la formación de compuestos de fosfatos de calcio relativamente insolubles, son aparentemente reversibles a bajos valores del pH del suelo. Por otra parte, los fosfatos de Al y Fe formados a bajos valores del pH del suelo, son aparentemente irreversibles y ya no son disponibles con un subsecuente incremento del pH del suelo.

Hsu y Jackson (30) basándose en las evidencias de las relaciones entre el pH y la solubilidad de los fosfatos del suelo, consideran que es generalmente aceptado que los fosfatos minerales son dominantemente ligados al calcio en suelos calcáreos y principalmente ligados al aluminio o hierro en suelos ácidos.

Fox y colaboradores (22) encontraron que el fósforo era retenido más fuertemente por suelos de alto contenido de aluminio y minerales poco cristalinos. Suelos con arcillas tipo 2:1 fijaron mucho menos fosfato. En general, la intensidad de fijación para los varios sistemas mineralógicos fue el siguiente: óxidos amorfos hidratados > que el complejo goethita-gibsita cripto cristalina > caolinita > arcillas 2:1.

Wisklander (56) indica que la capacidad de adsorción de aniones por los suelos se incrementa con la acidez, a diferencia de lo que sucede con el intercambio de cationes. Informa así algunos datos sobre la adsorción de aniones, entre los cuales el anión PO_4^{3-} es adsorbido de 31,2 a 88,2 meq/100 g de coloide (caolinita) al descender el pH de 7,2 a 4,0, y para el caso de la montmorillonita

el PO_4^{3-} adsorbido aumenta de 22 a 110 meq/100 gr del coloide con un descenso del pH de 6,8 a 2,8.

En base a estos y otros resultados Wiklander opina (56) que la adsorción de aniones está intimamente relacionada con la naturaleza del coloide, tipo de arcilla y contenido de hidróxidos, materia orgánica, y con el pH del sistema.

Fassbender (17) al tratar de determinar la magnitud y factores que intervienen en la fijación de los fosfatos de algunos suelos volcánicos de América Central, encontró correlaciones positivas y altamente significativas entre la fijación de P y los siguientes componentes del suelo: por ciento de arcilla, por ciento de C total; por ciento de Fe y Al extraíble. En base a ello concluye que a mayor contenido de materia orgánica, arcilla, aluminio y hierro en los suelos, mayor será la fijación de fosfatos y menor será el efecto de los fertilizantes fosfatados. Por otra parte, al considerar la relación inversa que existe entre los factores de la fijación y la acidez del suelo, concluye que a mayor acidez del suelo mayor será la fijación.

Este mismo autor (17) determinando la diferencia entre la adsorción y la precipitación dentro del P fijado, llega a concluir que la precipitación de fosfatos es más importante que su adsorción.

Morillo (39) menciona, entre las conclusiones de su estudio, que la capacidad de retención de fosfatos en algunos suelos de Honduras es mediana y correlacionó negativamente con el pH de los suelos.

2. El encalado y la fijación del fósforo.

La fijación de P por los suelos tropicales es generalmente alta y por ello son necesarias altas dosis de fertilización. Un intento para la solución al problema es la actual suposición que la disponibilidad del P para las plantas aumenta tanto como los suelos son encalados hasta la neutralidad (22).

Fox et al (22) obtuvieron efectos benéficos del encalado en la solubilidad del fósforo en algunos suelos de Hawaii. El óptimo nivel de encalado para una menor fijación fue entre un pH de 5,0 a 6,0. Estos autores (22) también explican que no obstante que el Al activo influenciaba la solubilidad del P, el efecto de la mineralogía del suelo fue aparentemente superior. Aún cuando el Al activo fue reducido virtualmente a cero por el encalado, los suelos diferían tanto, unas 40 veces, en la solubilidad del P.

Fassbender (19) estudiando el efecto del encalado en un andosol de Costa Rica, no encontró ningún efecto sobre la retención de los fosfatos del suelo.

Fox et al (22) encontraron que la extracción de fósforo en suelos ácidos con óxidos amorfos, se incrementó con el encalado. Este efecto fue mayor cuando el encalado se realizó al momento de poner en contacto el fertilizante fosfatado con las raíces de las plantas. Por otra parte, el fósforo fue progresivamente menos disponible para las plantas con un mayor tiempo de reacción del encalado.

C. Efecto del encalado en la absorción de fósforo por las plantas.

En general la influencia de la reacción del suelo en la solubilidad o disponibilidad de los elementos nutritivos para las plantas es un hecho bien conocido, siendo la práctica del encalado un medio para obtener una mejor absorción de nutrimentos por las plantas. Sin embargo, el encalado ha dado diversos efectos sobre los diferentes elementos nutritivos del suelo. Ciertas correlaciones han sido encontradas, o sea desde el punto de vista de la absorción de estos nutrimentos por las plantas, sea por su disponibilidad y lixiviado. Aunque la literatura disponible es muy limitada, a continuación se presentan algunas referencias de estudios sobre estos efectos en el P del suelo.

El encalado por su efecto en el cambio de pH en suelos ácidos, ha dado resultados positivos en la mayor disponibilidad del fósforo (48). Al respecto, Bonnet et al (8) encontraron un incremento significativo del fósforo disponible después de una incubación con encalado de 15 y 23 meses, obteniendo así mismo un mayor contenido de P en los pastos utilizados, aún después del tercer corte.

Entre las conclusiones obtenidas por Fox et al (23) consideran que el nivel óptimo de encalado para proveer P soluble fue entre un pH de 5,0 a 6,0 considerando también que el efecto del encalado varía grandemente en los diferentes suelos.

Spencer (46) estudiando el efecto de la aplicación de fosfatos y encalado, obtuvo resultados significativos en la absorción

de fósforo por cítricos. El incremento de la dosis de encalado en los tratamientos sin P aumentó la absorción de P.

Fassbender (19) comenta los resultados experimentales en un andosol, en que los pequeños cambios producidos por el encalado en la disponibilidad del P no permiten esperar aumentos en la producción en dicho suelo; pero hace ver que la mayor absorción de P encontrada es explicable por las interacciones P - Ca - Mg. Añade así que como resultado de esas interacciones se establecen en el sistema fertilizante - suelo - planta condiciones que permiten una mejor utilización del fertilizante fosfatado aplicado.

Son varios los autores (1, 3, 22, 40) que a través de experiencias propias y evidencias de otros investigadores, coinciden en el efecto benéfico del encalado sobre la disponibilidad y absorción de P por las plantas.

III. MATERIALES Y METODOS

A. Localización.

La presente investigación se llevó a cabo en los laboratorios e invernaderos localizados en el Instituto Interamericano de Ciencias Agrícolas (IICA) en Turrialba, Costa Rica.

Las muestras de suelos utilizadas corresponden a los horizontes superiores de seis series de suelos de la zona oriental de la Meseta Central de Costa Rica.

Este estudio es parte de un proyecto de investigación que llevó a cabo el IICA, sobre efectos del encalado en la producción vegetal. Para determinar los efectos del encalado en la absorción y formas de fósforo se encaló las muestras de los suelos, con $CaCO_3$ y $MgCO_3$ en proporción 4:1 con dosis crecientes de la mezcla.

B. Suelos.

Las muestras de los seis suelos estudiados pertenecen a las series Birrisito, Cervantes, Colorado, Paraíso, Juray y El Banco; los dos primeros son suelos derivados de cenizas volcánicas, el tercero y el cuarto han sido clasificados como latosoles y los últimos dos son suelos de orígen aluvial.

Los suelos han sido clasificados por Dóndoli y Torres (14), descritos por Hardy (27) y caracterizados por Fassbender (15).

Algunas características establecidas por estos autores (14, 15) para estas series, en los horizontes superiores, son las siguientes: las series Birrisito y Cervantes son de alto contenido

en plagioclasas y piroxenos. La roca madre es de tipo andesítico. Ambas son de textura arcillosa. El contenido en sesquióxidos libres es moderadamente alto en la serie Birrisito (17,81%) un poco mayor en Porciento de Al_2O_3. En la serie Cervantes, el contenido en sesquióxidos libres es mediano (6,93%) con ligero predominio de Al_2O_3.

En las series El Banco y Juray el contenido en plagioclasas y piroxenos es muy variable, un poco más alto en la serie El Banco que en la Juray. Hay una presencia mayor de granos de cuarzo en ambas series, que en las otras series comprendidas en este estudio.

El material parental está compuesto de depósitos aluviales, recientes en el caso de la serie El Banco y antiguos en la Juray. La textura es arcillo-arenosa para esta última serie y arcillosa para la serie El Banco. El contenido en sesquióxidos libres es un poco diferente en ambas series, alto en la serie Juray (22%) predominando el Al_2O_3, bajo en la serie El Banco (6,8%) con valores más o menos similares de Al_2O_3 y Fe_2O_3.

En las series Colorado y Paraíso el contenido mineral en general es muy bajo, predominando los óxidos de hierro. El material parental, en la serie Colorado está formado por aglomerados viejos de lava con materiales arcillosos caolíniticos, altamente ferruginosos. En la serie Paraíso el material parental es del tipo andesita hipersteno augita. Ambas series son de alto contenido en sesquióxidos libres, con predominancia de los sesquióxidos de aluminio. Asímismo, la textura en ambas series es arcillosa.

Fassbender (15) considera que estos suelos pertenecen al grupo de los fuertemente ácidos. Los latosoles más ácidos que los aluviales y éstos que los derivados de cenizas volcánicas.

Los porcentajes de C y N son altos, siendo mayores para Birrisito y Cervantes y menores para El Banco y Juray. Los latosoles tienen valores intermedios.

C. Aplicación del encalado e incubación.

El encalado e incubación fueron realizados al iniciarse el proyecto de investigación en el cual está incluído el presente trabajo.

Se aplicaron dosis ascendentes del material de encalado correspondientes a 0, 1, 2, 4, 8, 16, 32 meq. (Ca + Mg)/100 g de suelo. Como material de encalado se utilizaron carbonatos químicamente puros en una proporción Ca:Mg de 4:1, de acuerdo a la experiencia de Laroche (34). La aplicación se llevó a cabo por medio de una mezcladora rotativa. Luego de esta operación se humedecieron los suelos y se regaron semanalmente. El tiempo de incubación fue de cinco meses.

Los resultados de los análisis químicos obtenidos por Piñeres (42) han sido incluídos y presentados en los Cuadros 1, 2, 3. En dichos cuadros se observan los efectos del encalado sobre el pH y el complejo de intercambio iónico. De acuerdo a las dosis crecientes de encalado se incrementan los valores de pH, de la capacidad total de cambio y del porcentaje de saturación de bases. Los mayores incrementos de los valores de pH se observan en los suelos latosólicos y aluviales, lo cual es debido a la mayor capacidad amortiguadora de los suelos derivados de cenizas volcánicas, por su alto contenido de materia orgánica. Estos incrementos de pH presentan una correlación positiva con los valores del porcentaje de

saturación de bases, observándose los mayores incrementos en los suelos latosólicos y aluviales que en los suelos derivados de ceniza volcánica.

Después de la incubación se tomaron muestras de cada tratamiento. Submuestras de las mismas fueron secadas y tamizadas por mallas de 2mm de diámetro para la determinación de las formas y fijación de P, así como potenciales químicos.

CUADRO 1. Efecto del encalado sobre el pH, CIC, bases y acidez cambiables en los suelos derivados de cenizas volcánicas.

Suelo:	Tratamiento (meq/100 g)	pH $CaCl_2$	CIC	Ca	Mg	K	Al	% Saturación
			meq/100 g suelo					
Juan Viñas	0	4,20	52,4	1,0	0,52	0,09	6,6	4,4
	1	4,40	50,3	2,1	0,69	0,09	6,2	5,7
	2	4,50	50,6	2,7	0,98	0,09	5,0	7,5
	4	4,60	52,8	3,3	1,32	0,09	4,5	8,9
	8	5,05	53,0	5,7	2,16	0,08	4,2	15,0
	16	5,60	53,4	8,1	4,56	0,09	4,1	23,1
	32	6,00	57,4	11,6	9,18	0,07	2,5	36,3
Cervantes	0	5,15	82,3	7,0	1,36	0,80	2,8	11,2
	1	5,10	81,2	7,4	1,56	0,77	2,4	12,1
	2	5,20	83,4	7,3	1,84	0,67	1,4	11,8
	4	5,30	85,1	8,1	2,42	0,67	1,6	13,6
	8	5,50	86,1	11,0	3,80	0,70	1,6	18,1
	16	5,75	87,5	14,0	6,13	0,75	1,5	23,4
	32	6,30	88,2	19,2	11,20	0,75	1,3	36,1

CUADRO 2. Efecto del encalado sobre el pH, CIC, bases y acidez cambiables en los suelos aluviales.

Suelo:	Tratamiento (meq/100g)	pH $CaCl_2$	CIC	Ca	Mg	K	Al	% Saturación
			meq/100 g suelo					
Juray	0	4,40	34,0	3,4	1,23	0,41	5,8	14,9
	1	4,45	34,5	3,6	1,38	0,41	5,2	15,7
	2	4,40	35,7	5,1	1,93	0,40	2,9	20,3
	4	5,25	36,7	6,2	2,10	0,38	2,3	25,7
	8	5,90	36,9	9,1	3,12	0,39	1,9	34,2
	16	6,15	37,4	12,5	4,28	0,38	1,3	46,0
	32	6,85	39,9	14,0	6,89	0,37	1,0	53,4
El Banco	0	5,10	27,1	9,4	5,74	1,03	1,8	52,3
	1	5,50	27,6	9,5	4,02	1,03	1,5	52,7
	2	5,60	27,7	10,4	4,26	0,98	1,3	56,5
	4	5,90	27,4	11,4	4,85	0,95	1,2	67,8
	8	6,15	27,8	12,1	5,21	0,90	1,0	65,3
	16	6,60	28,9	13,4	7,07	0,95	0,9	74,1
	32	7,00	29,1	15,0	12,14	0,93	0,8	96,5

CUADRO 3. Efecto del encalado sobre el pH, CIC, bases y acidez cambiables en los suelos latosólicos.

Suelo:	Tratamiento (meq/100g)	pH $CaCl_2$	CIC	Ca	Mg	K	Al	% Saturación
			meq/100 g suelo					
Colorado	0	3,75	32,9	1,4	0,44	0,16	16,9	6,10
	1	4,05	41,5	1,8	0,66	0,17	11,4	6,30
	2	4,15	41,6	3,0	1,05	0,15	10,6	10,10
	4	4,40	42,3	4,5	1,59	0,15	9,8	14,70
	8	5,05	43,5	7,4	3,11	0,15	8,7	24,40
	16	5,75	45,7	11,9	5,16	0,14	9,7	27,60
	32	6,30	44,8	18,1	10,49	0,15	6,2	64,1
Paraíso	0	4,95	26,1	6,0	2,80	1,78	2,2	40,8
	1	5,25	26,8	6,4	2,89	1,70	1,8	41,2
	2	5,35	26,9	7,0	3,15	1,78	1,5	44,4
	4	5,40	27,5	8,2	3,87	1,75	1,2	50,5
	8	6,45	27,5	10,4	4,59	1,75	1,2	61,1
	16	6,60	27,4	13,2	5,41	1,75	1,0	74,5
	32	6,90	27,9	13,2	9,84	1,65	0,8	90,9

D. Experimento de invernadero.

Con otras submuestras de los suelos incubados se efectuó un experimento de invernadero con cinco repeticiones, empleando 650 gramos de suelo por maceta para los suelos derivados de cenizas volcánicas y 800 gramos para los otros suelos, de acuerdo a la densidad aparente de los smismos.

A todas las macetas se les aplicó una fertilización básica de N, P, K y elementos menores. En el Cuadro 4 se presentan la fuente y concentración de cada nutrimento aplicado.

CUADRO 4. Cantidad de nutrimentos aplicados y fuente utilizada.

Nutrimento expresado como	ppm	Fuente
N	235	$NH_4 H_2 PO_4$
P	500	$NH_4 H_2 PO_4$
K	195	K Cl
Fe_2O_3	55	Fe - Citrato
Zn O	22	$Zn SO_4 \cdot 7H_2 O$
$Mn_2 O_3$	55	$Mn SO_4 \cdot H_2 O$
Cu O	4	$Cu SO_4 \cdot 5H_2 O$
$B_2 O_3$	4	$Na B_4 O_7 \cdot 10H_2O$
$Mo_2 O_3$	4	$Na MoO_4 \cdot 2H_2 O$

La aplicación del $NH_4 H_2 PO_4$ finamente molido (cristalizado) se localizó a una profundidad de 5 cm. Los nutrimentos menores se aplicaron en disolución al igual que el cloruro de potasio.

Después de esta fertilización las submuestras en las macetas se mantuvieron alrededor de la capacidad de campo durante 14 días para lograr la equilibración de los elementos aplicados. Después de ese tiempo se tomaron muestras de cada repetición para determinar nuevamente los diferentes potenciales químicos.

La planta usada como indicador fue tomate (Lycopersicum scu lentum var. J. Morán) y fue sembrada en las macetas. Después de la germinación se hicieron raleos sucesivos hasta mantener finalmente seis plantas por maceta. A los 45 días después de la siembra se cosechó la parte aérea de las plantas. Se determinó en ellas la producción de materia seca después de secadas en una estufa de ventilación forzada a 70°C por 48 horas.

E. Determinaciones en el laboratorio.

1. Análisis de suelos

Todos los análisis de suelos fueron realizados por duplicado en submuestras de las cinco repeticiones. Los análisis se efectuaron siguiendo las etapas del experimento: después de incubadas, antes de la siembra y después de la cosecha. Los respectivos análisis en cada etapa se detallan a continuación.

a. Análisis después de la incubación.

Con el objeto de determinar el efecto del encalado en las formas y la retención de P, en el fósforo total y su solubilidad, se analizaron las muestras de suelos después de la incubación.

1) Fraccionamiento de los fosfatos. El fraccionamiento de los fosfatos inorgánicos se llevó a cabo de acuerdo al método de Chang y Jackson (11) y la modificación propuesta por Chang et al (10). Las extracciones se hicieron en orden sucesivo con los

reactivos siguientes:

Fosfatos solubles con NH_4 Cl, 1N

Fosfatos de aluminio con NH_4F 0,5 N a pH 7,0

Fosfatos de hierro con NaOH 0, 1N

Fosfatos de calcio con H_2SO_4 0,5 N

Fosfatos solubles en reductantes con citrato de sodio 0,3 M ditionito de sodio

Fosfatos ocluidos en hidróxidos con Na OH 1N

En cada extracto obtenido se determinó el fósforo por el método indicado en un medio cloro o sulfomolíbdico (11), según el caso y se midió la concentración de P en un espectrofotómetro Coleman Universal 14. La suma de estas fracciones se consideró como fosfatos inorgánicos.

2) Fosfatos totales. Los fosfatos totales se determinaron por digestión en plancha eléctrica de 3,1 gramo de suelo con una mezcla de ácidos nítrico, perclórico, clorhídrico y sulfúrico (52).

El extracto se preparó diluyendo el residuo cristalino de la digestión con 100 ml de agua destilada.

De este extracto se tomaron alícuotas variables para la determinación de fosfatos por el método del sulfomolíbdico y cloruro estanoso, midiendo la concentración de P en un espectrofotómetro Coleman Universal Modelo 14 (11).

3) Fosfatos orgánicos. Los fosfatos orgánicos se determinaron indirectamente por diferencia entre los fosfatos totales y la suma de los fosfatos inorgánicos.

4) Retención de fosfatos. La retención de fosfatos por el suelo se determinó según el método propuesto por Fassbender e Igue (19). Se pesaron 0,5 gramos de suelo seco al aire, se les aplicó 25 ml de una disolución de fosfato ácido de potasio (KH_2PO_4) con una concentración de 100 ppm de P. Se agitó mecánicamente por 6 horas, luego se centrifugó y del supernatante se tomaron alícuotas para la determinación colorimétrica del P. El fosfato retenido se calculó por diferencia entre el aplicado y el determinado en el supernatante. Loa valores se expresan en por cientos de fósforo aplicado.

5) Potenciales químicos. Esta determinación se efectuó de acuerdo al método propuesto por Ulrich (51) y descrito por Fassbender (18). Se pesaron muestras de 65 y 80 g de suelo de acuerdo a su densidad aparente, a las cuales se agregaron una cantidad de agua equivalente. Se agitó mecánicamente durante 24 horas y se determinó el pH en la pasta de suelo con un potenciómetro Beckman con electrodo de vidrio. Inmediatamente después se centrifugó durante 30 minutos, decantando el supernatante que representa a la solución equilibrada del suelo. En la misma se determinó Ca, Mg, K, Na, Al y P. Los cuatro primeros elementos se determinaron usando un espectrofotómetro de absorción atómica modelo 303 de la firma Perkin Elmer. El fósforo se determinó por medio del método del sulfomolíbdico (11). El aluminio se determinó por medio de trietanolamina y aluminona de acuerdo con el método indicado por McLean (38).

Las concentraciones de los elementos en la solución equilibrada del suelo se convirtieron en moles por litro para calcular sus diferentes masas activas (a_x), llevándolas a su expresión logarítmica (p Ca, p Mg.....).

La fórmulas empleadas para calcular las masas activas fuefon las siguientes (18, 48):

Para cationes

$$a_x = f_x \cdot C_x$$

$$- \log f_x = A\ z^2 \sqrt{I}$$

En donde f_x es el coeficiente de actividad iónica, C_x es la concentración del catión en moles por litro, A es una constante igual a 0,51 a 25°C, z es la valencia del catión; el valor I es conocido como fuerza iónica y es igual a la semisuma del producto de las concentraciones de todos los iones presentes en la solución por el cuadro de su respectiva valencia. La fórmula correspondiente es la siguiente:

$$I = 1/2\ (C_1\ z_1^2 + C_2\ z_2^2 + \ldots\ldots\ldots + C_n Z_n^2)$$

Para anión fosfato la fórmula empleada es la indicada por Ulrich (18, 48):

$$a_{H_2PO_4^-} = \frac{C_p \cdot a_{H^+} \cdot f^{2+}}{6{,}53 \times 10^{-8} + a_H + \frac{f^{2+}}{f^{1+}}}$$

En la cual tenemos que "a" indica masas activas del $H_2PO_4^-$ y del H^+, Cp la concentración de fósforo en moles por litro, f^{2+} y f^{1+} son coeficientes de actividad correspondientes a iones mono y divalentes.

El valor $6,53 \times 10^{-8}$ es una constante, derivada de la segunda constante de ionización del ácido fosfórico.

b. Análisis antes de la siembra.

En las submuestras fertilizadas tomadas antes de la siembra se efectuaron las determinaciones correspondientes para calcular sus respectivos potenciales químicos, de acuerdo con el método descrito anteriormente.

Las determinaciones de estos potenciales en esta etapa del experimento se hicieron con el propósito de establecer el grado de correlación entre los potenciales químicos y la absorción de los elementos por las plantas de tomate.

Los cálculos de los potenciales se efectuaron en la misma forma que los potenciales químicos anteriormente explicados.

c. Análisis después de la cosecha.

Al final de la cosecha de la parte aérea de las plantas, se tomaron nuevamente muestras del suelo para determinar sus diferentes potenciales químicos. Como en la etapa anterior, estas determinaciones se hicieron con el fin de establecer si existía o no correlación entre los potenciales químicos y la absorción de los elementos por la planta en los diferentes tratamientos.

2. Análisis vegetal.

Las muestras de la materia seca fueron molidas en un molino semicro de Wiley, pasándolo por un tamiz de 40 mallas por pulgada cuadrada. Se efectuó una digestión en plancha eléctrica de 1 gramo de materia seca con mezcla de ácidos nítrico y perclórico en una relación 5:1. El residuo se diluyó a 100 ml, de éste se tomaron alícuotas para diluir convenientemente y efectuar las

determinaciones de calcio, en un espectrofotómetro de absorción atómica, marca Perkin Elmer, modelo 303. El fósforo se determinó colorimétricamente usando el mismo extracto (11). El aluminio fue determinado según el método de McLean (38).

3. Análisis estadístico.

Los resultados obtenidos fueron sometidos a un análisis estadístico calculándose medias aritméticas y desviaciones standars. Al mismo tiempo se investigó sobre el grado de relación que pudiera existir entre algunas variables mediante un análisis de correlación y regresión.

Los datos fueron procesados en una computadora electrónica IBM 1620 - 40K.

IV. RESULTADOS Y DISCUSION

A. Efecto del encalado en las formas de fosfatos.

En los Cuadros 5, 6 y 7 en el Apéndice se presentan los resultados analíticos del contenido de las diferentes formas de fosfatos y del pH, correspondientes a cada dosis de encalado aplicada a suelos derivados de cenizas volcánicas, aluviales y latosólicos respectivamente. La suma de los fosfatos de aluminio, hierro, calcio y solubles en NH_4Cl ha sido considerado como el total de los fosfatos activos del suelo y sobre esta base se expresan los valores relativos de los tres primeros, como porcentaje de los fosfatos activos totales.

Como puede observarse en dichos cuadros, la variación del pH corresponde a las dosis crecientes de encalado.

En los Cuadros 8, 9 y 10 del Apéndice se presentan las ecuaciones de regresión y los valores de "R" que alcanzaron niveles aceptables de significancia estadística, encontrados al correlacionar el contenido de las formas de fosfatos activos y de fosfatos orgánicos con las dosis de encalado y con el pH.

1. Suelos derivados de cenizas volcánicas.

En los suelos derivados de cenizas volcánicas se encontraron asociados al encalado y al pH solamente los fosfatos de hierro y orgánicos en el suelo Birrisito y los fosfatos de Al, Fe y Ca en el suelo Cervantes, tal como lo indican los coeficientes de correlación y sus respectivos índices de asociación (Cuadro 8).

De acuerdo con las ecuaciones de regresión cuadráticas, se observa que los fosfatos de aluminio en el suelo Cervantes, tienden a incrementarse de 61,8 a 73,0 ppm, hasta la dosis de 12 meq (Ca + Mg) para luego disminuir en las dosis mayores.

Con respecto a los fosfatos de hierro, según las respectivas ecuaciones de regresión se observa en ambas series, la tendencia a incrementarse. En la serie Birrisito los valores se incrementan de 47 a 95 ppm y en la serie Cervantes, de 64 a 115 ppm. En lo que se refiere a los fosfatos de calcio, únicamente en la serie Cervantes presentan asociación significativa con el encalado y el pH. Las ecuaciones de regresión indican una disminución de esta fracción a través de las dosis de encalado y el incremento de pH, hasta un mínimo de 180 ppm, en la dosis de 28 meq (Ca + Mg), iniciándose luego un incremento. Los fosfatos orgánicos presentan una correlación cuadrática significativa al 5% con el encalado, únicamente en la serie Birrisito. La tendencia indicada por su respectiva ecuación de regresión es inicialmente a incrementar hasta niveles intermedios de encalado (12 meq) para disminuir hacia la dosis máxima, hasta un valor de 988 ppm.

Las anteriores tendencias sugieren que en general las dosis iniciales de encalado producen un efecto contrario al esperado, pues se incrementan los fosfatos de hierro en ambas series, y se disminuyen los de calcio en la serie Cervantes; sinembargo, al acercarse a la dosis máxima usada, se nota cierto efecto positivo al disminuirse los fosfatos de aluminio e incrementarse los fosfatos de calcio en la serie Cervantes, y una disminución de los fosfatos orgánicos en la serie Birrisito. Lo anterior puede ser debido

al grado inicial de insaturación en bases de estos suelos, lo cual da lugar a que el Ca^{2+} y el Mg^{2+} ocupen posiciones de cambio en el complejo de adsorción liberando Al^{3+} y Fe^{3+}, los cuales dan lugar a los incrementos observados; cuando las dosis de encalado son mayores se inicia la hidrólisis de los fosfatos de aluminio y una mayor mineralización del P orgánico, esto último por un cambio adecuado en la reacción del suelo. Respecto a esto hay que agregar que la variación del pH obtenida por el encalado en el suelo Birrisito es mayor y a partir de valores iniciales menores que en el caso de la serie Cervantes, lo cual dió lugar a una mayor actividad biológica y por consiguiente a una mayor mineralización del P en la serie Birrisito.

2. Suelos aluviales.

En los suelos aluviales se encontraron asociados (Cuadro 9) al encalado y al pH solamente los fosfatos de Ca y orgánicos en el suelo Juray y únicamente con el encalado los fosfatos de Ca, los fosfatos solubles en NH_4Cl y los porcentajes de P activo de los fosfatos de hierro, en el suelo El Banco, Con respecto a los fosfatos de Al solamente se encontró asociación con el pH en la serie Juray y con el encalado en la serie El Banco, en este último caso fue contra el porcentaje de fosfatos de Al del P activo.

De acuerdo con las respectivas ecuaciones de regresión cuadrática se observa que los porcentajes de los fosfatos de Al, en la serie El Banco, tienden a disminuir ligeramente (11,5 a 9,6%) con las dosis crecientes de encalado y en la serie Juray disminuyen (84,5 a 68,7 ppm) hasta valores intermedios (pH de 5,2) para

luego incrementarse (a 86,3 ppm) en las dosis mayores. Los porcentajes de fosfatos de Fe, en la serie El Banco, disminuyen (70% a 59%) hasta un valor de la dosis de 22 meq (Ca + Mg) para aumentar ligeramente (60,3%) hacia la dosis máxima. Los fosfatos de Ca tienden a incrementarse en la serie El Banco (de 25 a 53 ppm) hasta la dosis de 22,5 meq para disminuir ligeramente (49 ppm) hacia la dosis máxima. En cambio, en la serie Juray los fosfatos de Ca disminuyen hasta un mínimo de 59 ppm, en la dosis de 13,7 meq incrementándose (71 ppm) hacia la dosis máxima.

Los fosfatos solubles en NH_4Cl muestran únicamente una tendencia significativa asociada al encalado, en la serie El Banco, aumentando (2,3 a 4,9 ppm) según las dosis crecientes de encalado. Los fosfatos orgánicos en la serie Juray tienden a incrementarse hasta un máximo (1643 ppm) en la dosis de 18,6 meq para luego disminuir hacia la dosis de 32 meq.

Las tendencias observadas indican en ambas series, ciertos procesos ligados a varias características de los suelos, mayormente en el suelo Juray. Es de notar sinembargo, un efecto ligeramente positivo del encalado, ya que se obtuvo en las dosis máximas un mayor contenido de fosfatos de Ca, y un menor contenido de fosfatos de Al, que el inicial. También este efecto está indicado por el ligero incremento de los fosfatos solubles en NH_4Cl, en la serie El Banco. El efecto del encalado está en parte disminuido por el alto contenido en carbono orgánico y arcilla, en ambos suelos, y así mismo por el alto contenido de sesquióxidos de la serie Juray (15). Es posible, en este caso una

formación de humatos de calcio y por otra parte una reprecipitación de los fosfatos de Al y Fe por la presencia de Al^{3+} y Fe^{3+} en la solución del suelo.

3. Suelos latosólicos.

En los suelos latosólicos (Cuadro 10), se encontraron asociaciones significativas entre algunas formas de fosfatos y el encalado y el pH. En la serie Colorado fueron los fosfatos de aluminio y de calcio y los porcentajes de fosfatos de hierro. En la serie Paraíso las asociaciones significativas fueron con los fosfatos de aluminio, hierro y calcio, además se presentó asociación únicamente con el encalado y los fosfatos solubles en NH_4Cl.

De acuerdo a las correspondientes ecuaciones de regresión cuadrática se observa que los fosfatos de aluminio, en la serie Colorado, tienden a disminuir hasta un mínimo (38,6 ppm) en un valor de 18,7 meq. de la dosis de encalado para incrementarse hacia la última dosis. En la serie Paraíso, en cambio, los fosfatos de aluminio presentan un mínimo (35,4 ppm) en la dosis del meq. para incrementarse en todas las siguientes dosis, no así los de hierro que tienen una marcada tendencia a disminuir (150 a 102 ppm). Los fosfatos de calcio, en ambas series, tienden a incrementarse progresivamente en todo el orden creciente del encalado, a diferencia que en la serie Paraíso se inicia ese incremento a los 8 meq. Los fosfatos solubles en NH_4Cl disminuyen, pero con muy pequeños decrementos en la serie Paraíso (2,0 a 0,9 ppm). Con respecto al pH se nota en general, las mismas tendencias, observándose únicamente que los fosfatos de aluminio inicialmente decrecen, hasta un pH de 5,4 en la serie Colorado y de 5,6 en la

serie Paraíso para incrementarse en los siguientes valores. Por otra parte se observa, en ambas series que los valores relativos de los fosfatos de hierro se incrementan hasta valores interme-- dios de pH 5,3 para la serie Colorado y 5,5 en la Paraíso, dismi nuyendo hacia los valores mayores.

Lo anterior indica que el efecto del encalado, en ambas series, fue diferente con respecto a los fosfatos de aluminio y hierro. En la serie Colorado se nota un efecto inicial positivo en los fosfatos de aluminio y solamente al final con los fosfa-- tos de hierro. Esto indica que la hidrólisis efectiva fue ini-- cialmente mayor para los fosfatos de aluminio y luego, al final para los fosfatos de hierro.

En cambio en la serie Paraíso, el efecto fue negativo para la disminución de los fosfatos de aluminio y positivo para los de hierro. En lo que se refiere a los fosfatos de calcio el efecto fue idéntico en ambas series, incrementándose dichos fosfatos. Todo esto nos indica, que el efecto del encalado estuvo dirigido por la hidrólisis diferencial de los fosfatos de alu-- minio y de hierro y por el mayor contenido de Al_2O_3 que de Fe_2O_3, en ambas series. Estos resultados coinciden, en forma general con los obtenidos por Fox y colaboradores (22). Asímismo, el contenido diferente de Al^{3+} cambiable y del valor inicial del pH está influyendo en el efecto del encalado en cada serie. Los fosfatos orgánicos no alcanzan un grado significativo de asociación con el encalado y el pH.

Los resultados aquí presentados serán discutidos en detalle, con los resultados subsiguientes sobre la solubilidad de los fosfatos.

B. Efecto del encalado en la solubilidad de los fosfatos.

El efecto del encalado en la solubilidad de los fosfatos del suelo se estableció por medio de los parámetros físico químicos, pH + pH_2PO_4, pH - 0,5 pCa y pH - 0,33 pAl. Los diagramas utilizados son los propuestos por Ulrich y Kahna (53) y por Lindsay y Moreno (36). De acuerdo al diagrama de Ulrich y Kahna se presentan las isotermas de solubilidad de los diferentes fosfatos, en las Figuras 1, 3 y 5, para los suelos derivados de cenizas volcánicas, los suelos aluviales y latosólicos respectivamente. Las isotermas de solubilidad, en este diagrama están representadas de acuerdo a las fórmulas siguientes:

1) pH + pH_2PO_4 = 2,00 (pH - 0,5 pCa) - 0,53 para fosfato dicálcico

2) pH + " = 2,66 (pH - 0,5 pCa) - 3,26 para fosfato octocálcico

3) pH + " = 3,33 (pH - 0,5 pCa) - 4,70 para apatito hidroxidado

4) pH + " = 3,00 (pH - 0,33 pAl)+ 2,50 para fosfato alumínico cristalino

5) pH + " = 3,00 (pH - 0,33 pAl)+ para fosfato alumínico amorfo

En todos los tratamientos de encalado de las tres series estudiadas se determinó la correlación, en un solo conjunto, entre los parámetros pH - 0,5 pCa y pH - 0,33 pAl, para lograr la transición entre ambos parámetros, en la escala del diagrama. La ecuación obtenida fue la siguiente:

$$Y\ (pH - 0{,}33\ pAl) = 0{,}40 + 0{,}856^{X}\ (pH - 0{,}5\ pCa)$$

$$r = 0{,}976^{**}$$

$$n = 39$$

El diagrama propuesto por Lindsay y Moreno (36), se estableció de acuerdo a las fórmulas siguientes:

1) $pH_2PO_4 = pH - 3{,}14$ para fosfato dicálcico dihidratado

2) $pH_2PO_4 = 1{,}66\ pH - 7{,}22$ para fosfato octocálcico

3) $pH_2PO_4 = 2{,}33\ pH - 9{,}40$ para apatito hidroxidado

4) $pH_2PO_4 = 2\ pH - 5{,}18$ para apatito fluorado

5) $pH_2PO_4 = 10{,}7 - pH$, para fosfato alumínico

En base a este diagrama se presenta el efecto del encalado, en las Figuras 2,3 y 6, para los suelos derivados de cenizas volcánicas, los suelos aluviales y latosólicos, respectivamente.

1. Suelos derivados de cenizas volcánicas.

El efecto del encalado en la solubilidad de los fosfatos de los suelos derivados de cenizas volcánicas es notable, un poco mayor en la serie Cervantes que en la serie Birrisito. La solubilidad inicial de los fosfatos de ambas series está situada entre los fosfatos alumínicos cristalinos y amorfos, según el diagrama de Ulrich y Kahna (Fig. 1), y entre los fosfatos alumínicos, según el diagrama de Lindsay y Moreno (Fig. 2). La solubilidad inicial de los fosfatos en la serie Birrisito es más baja, hacia los fosfatos alumínicos cristalinos.

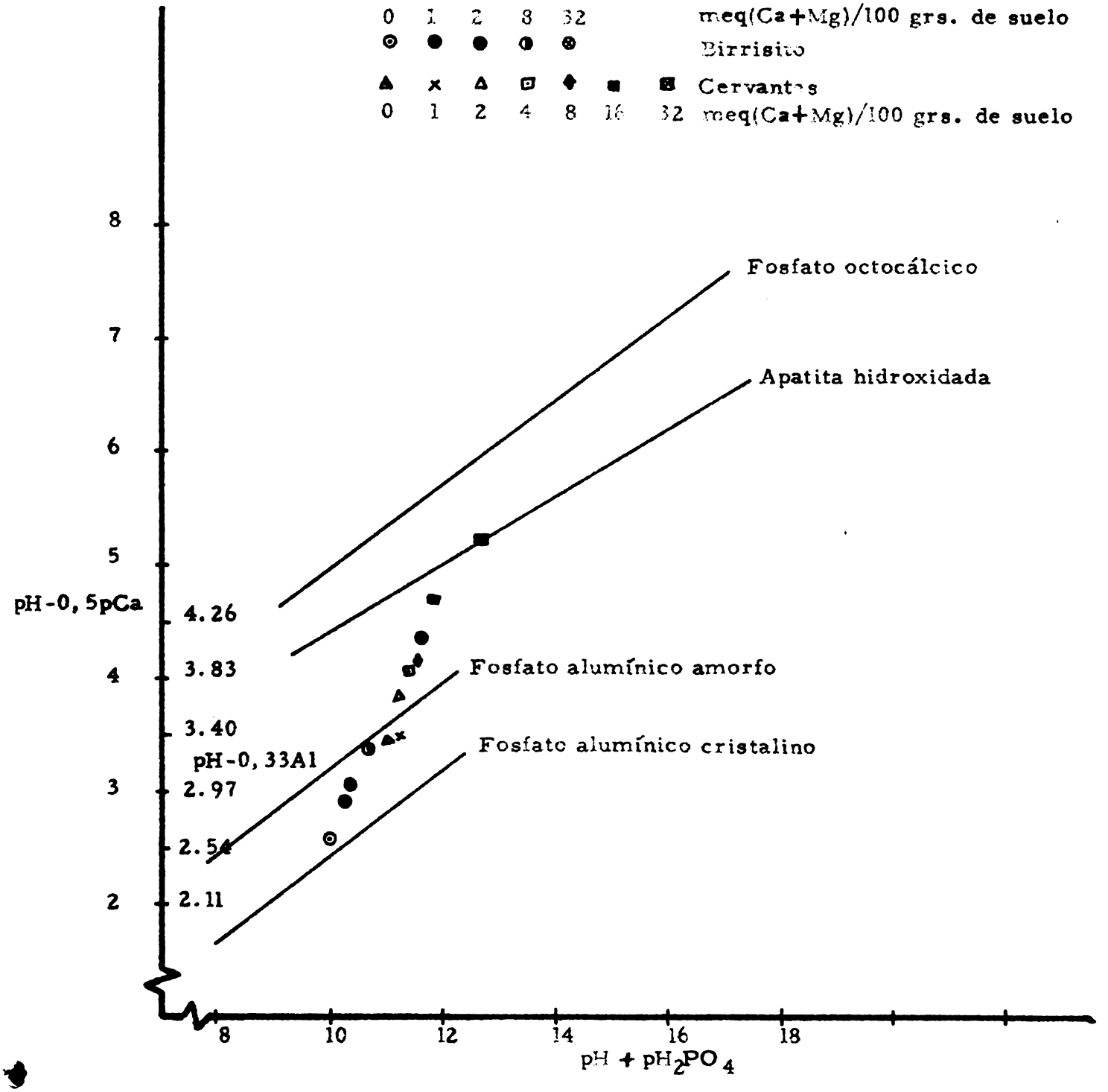

Fig. 1 Efecto del encalado sobre la solubilidad de los fosfatos de los suelos Birrisito y Cervantes (Según Ulrich y Kahna)

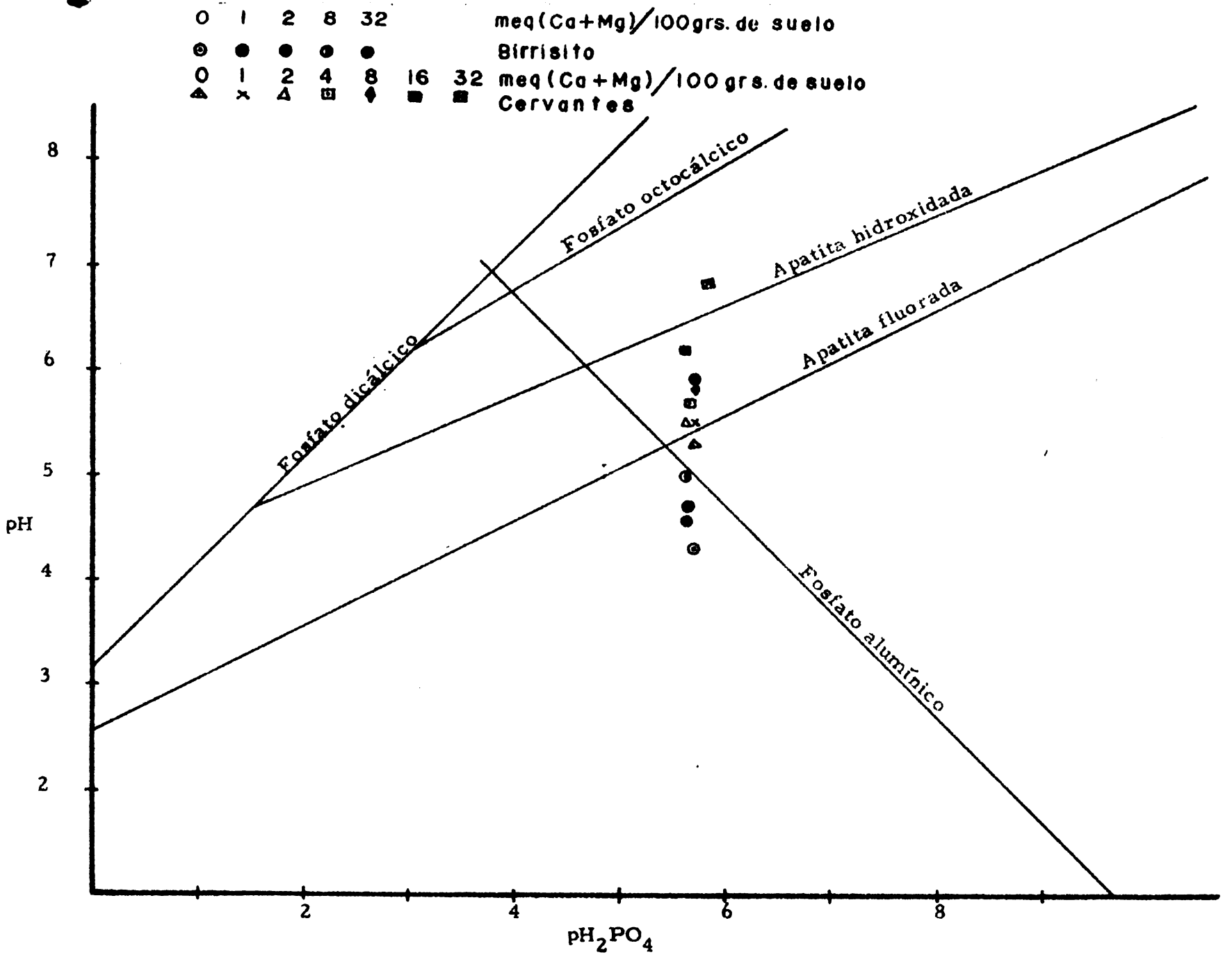

Fig. 2 Efecto del encalado sobre la solubilidad de los fosfatos de los suelos Birrisito y Cervantes (Diagrama de Lindsay y Moreno, 36).

En ambos diagramas se puede observar que a medida que se incrementa la dosis de encalado se produce un aumento de la solubilidad de los fosfatos, alcanzando las proximidades de la apatita hidroxidada. A valores de pH + pH_2PO_4 de 12 y pH - 0,5 pCa entre 4 y 5 se tiene la mayor solubilidad.

En la Figura 2 se puede observar que la variación de la solubilidad de los fosfatos se incrementa verticalmente, esto nos indica que aunque la concentración activa de $H_2PO_4^-$ no se incrementa notablemente, la variación del pH por el encalado está subordinando la solubilidad de los fosfatos.

2. Suelos aluviales.

En las figuras 3 y 4 se puede observar el efecto del encalado en la solubilidad de los fosfatos de ambas series aluviales. El encalado produce una mayor solubilidad, alcanzando una solubilidad cercana a la correspondiente a la apatita hidroxidada. Esto es observable identicamente en ambos diagramas. La solubilidad inicial en ambas series difiere en cierto grado. Esta es mayor en la serie El Banco que la correspondiente a los fosfatos alumínicos amorfos, según el diagrama de Ulrich y Kahna o correspondiente a la solubilidad del apatito fluorado, según el diagrama de Lindsay y Moreno. En la serie Juray la solubilidad inicial de los fosfatos es menor y comparable con la de los fosfatos alumínicos según el diagrama de Lindsay y Moreno y específicamente un poco mayor que la de los fosfatos alumínicos cristalinos según el diagrama de Ulrich y Kahna (53).

A medida que se incrementa la dosis de encalado la solubilidad es mayor en ambas series, pero el cambio obtenido es más

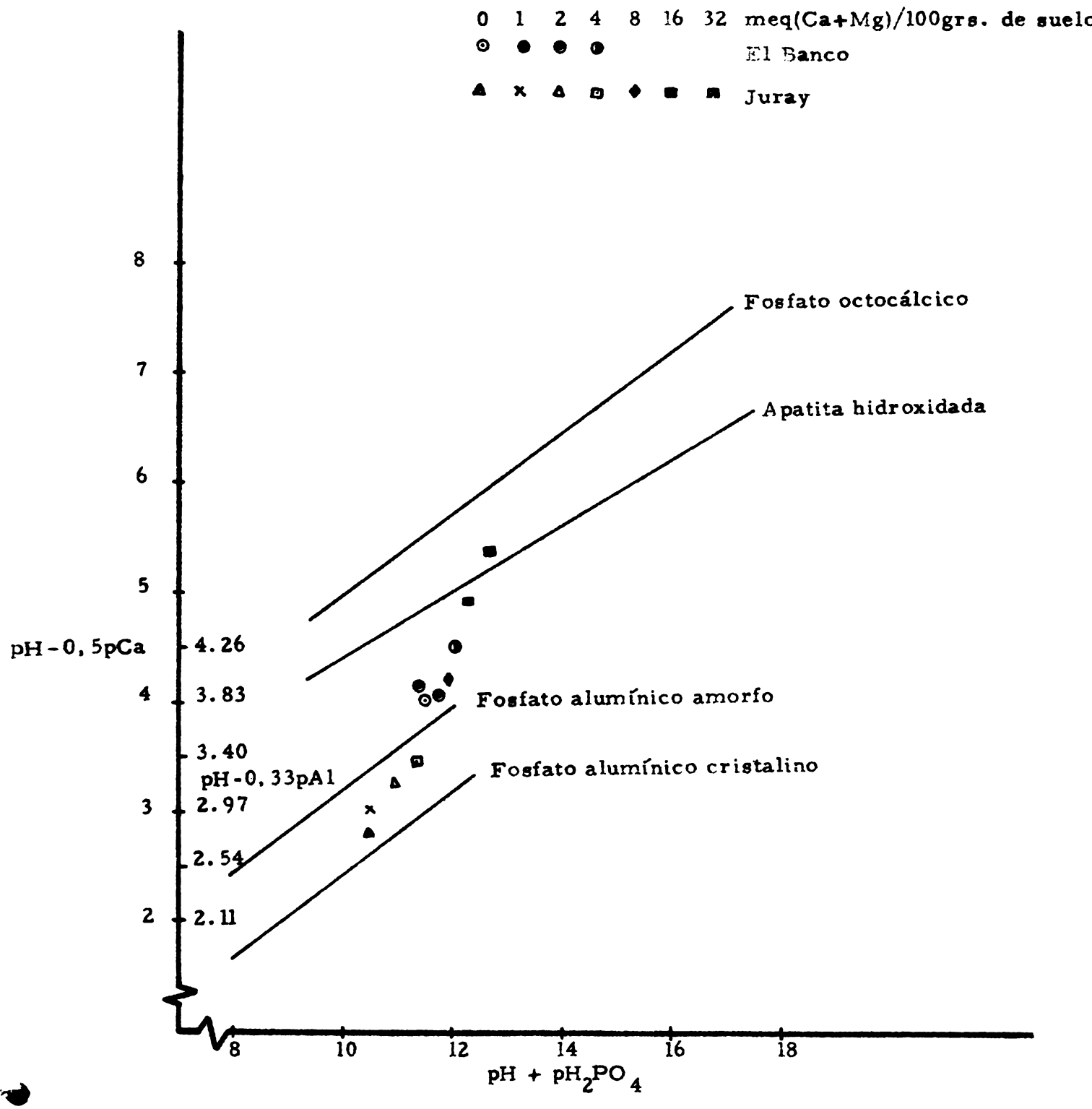

Fig. 3 Efecto del encalado sobre la solubilidad de los fosfatos de los suelos Banco y Juray (Según Ulrich y Kahna).

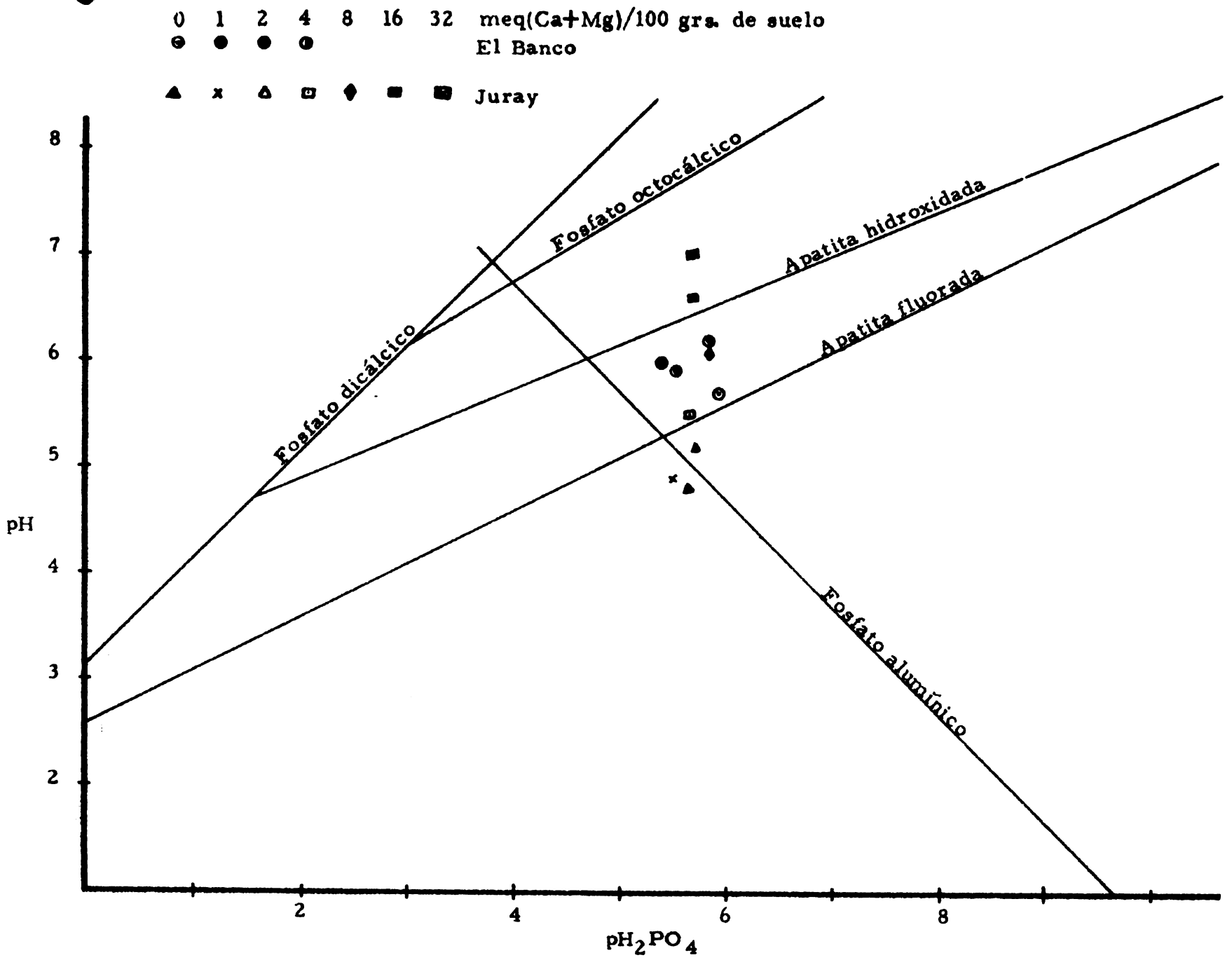

Fig. 4 Efecto del encalado sobre la solubilidad de los fosfatos de los suelos El Banco y Juray. (Diagrama de Lindsay y Moreno, 36).

notorio en la serie Juray que en la serie El Banco, a pesar de que la solubilidad inicial de aquella serie es menor.

Como en el caso de los suelos derivados de cenizas volcánicas, la mayor solubilidad está dependiendo de los incrementos en los valores del pH más que de la actividad iónica del pH_2PO_4 del suelo.

3. Suelos latosólicos.

En los suelos latosólicos es observable el mismo efecto del encalado sobre la solubilidad de los fosfatos, que en los casos anteriores (Figs. 5 y 6). El grado de solubilidad inicial en ambas series de suelos es diferente. En la serie Colorado, la solubilidad inicial es menor que la de la serie Paraíso y corresponde a la de los fosfatos alumínicos cristalinos; en cambio en la serie Paraíso, la solubilidad inicial es superior correspondiente a la de los fosfatos alumínicos amorfos de acuerdo al diagrama de Ulrich y Kahna y a la de la apatita fluorada, según el diagrama de Lindsay y Moreno.

Asímismo se observa en ambos diagramas, que el efecto del encalado sobre la solubilidad de los fosfatos es mayor en la serie Paraíso que en la serie Colorado. En esta última se obtiene un cambio muy apreciable en la solubilidad hasta el nivel máximo del encalado.

Los resultados y variaciones en la solubilidad de los fosfatos de los suelos de ambas series, anteriormente expuestos, son explicables si se consideran los valores iniciales del pH y sus variaciones de acuerdo al encalado. En la serie Colorado, el valor inicial del pH es de 3,9 y luego se incrementa muy poco en

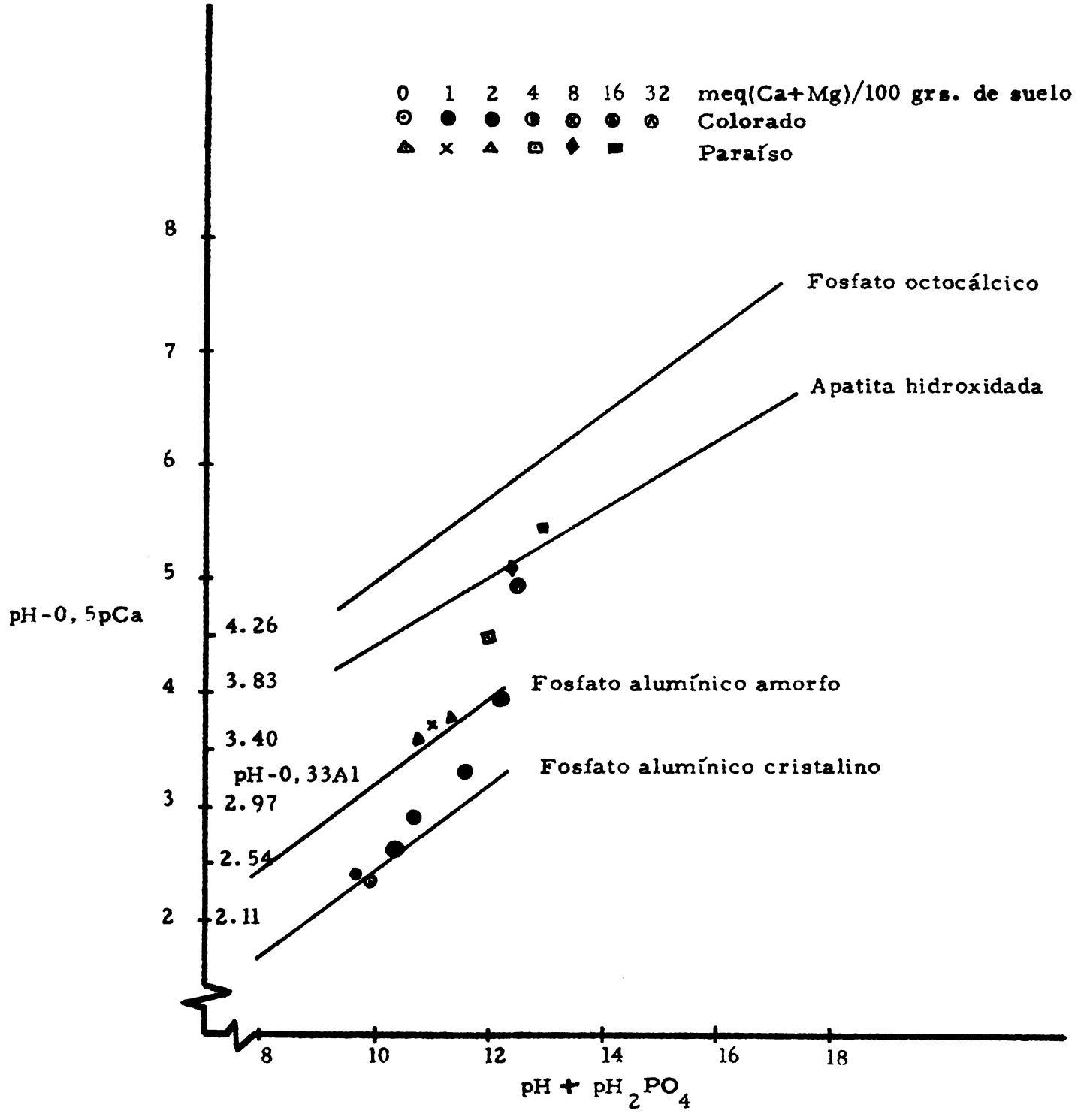

Fig. 5 Efecto del encalado sobre la solubilidad de los fosfatos de los suelos Colorado y Paraíso. (Según Ulrich y Kahna)

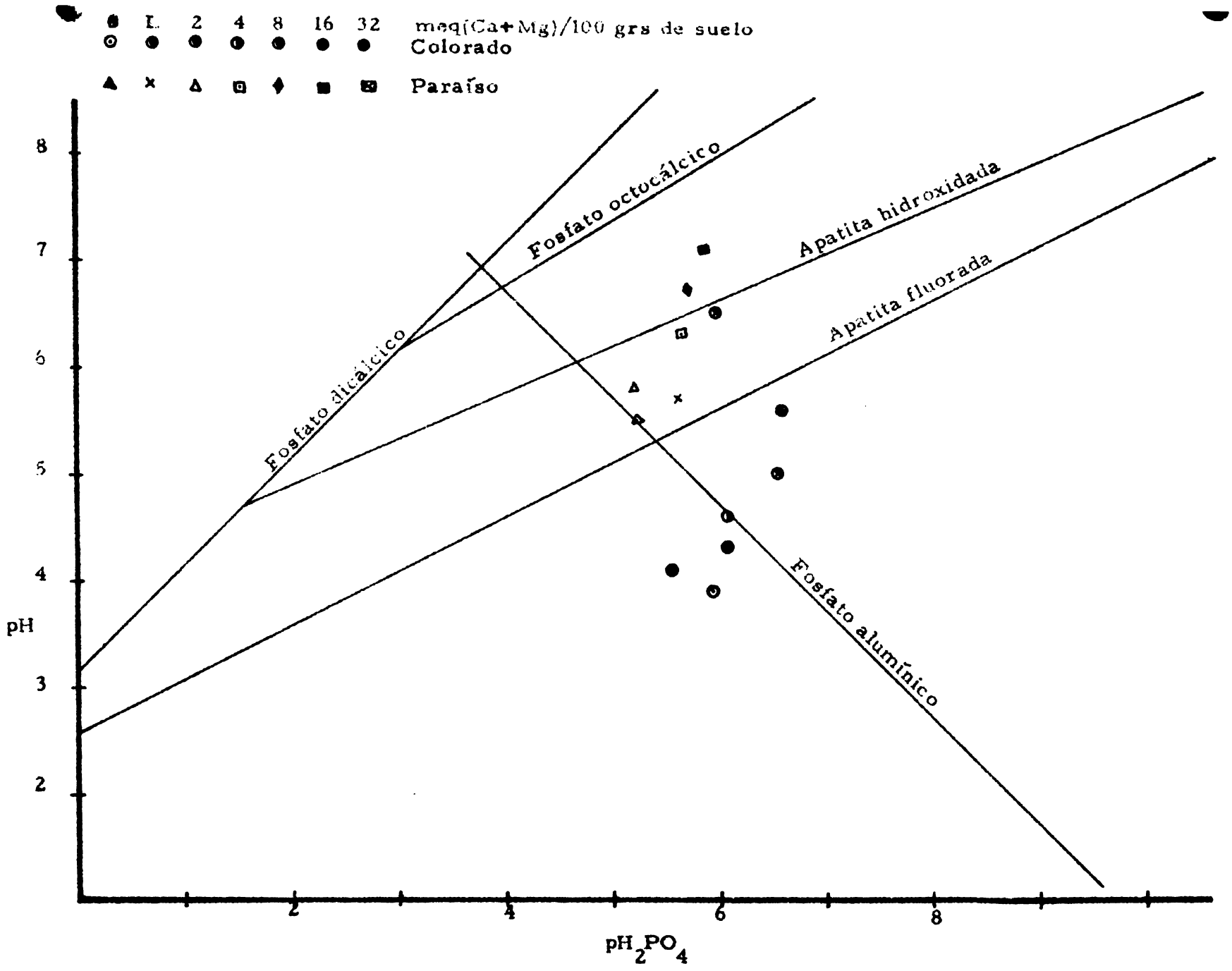

Fig. 6 Efecto del encalado sobre la solubilidad de los fosfatos de los suelos Colorado y Paraíso. (Diagrama de Lindsay y Moreno, 36).

las primeras dosis de encalado, hasta alcanzar un valor de 5,6 con la dosis de 8 meq. Con las dosis siguientes la variación del pH es notablemente mayor alcanzando un valor final de 6,5. Por otra parte en la serie Paraíso los valores de pH inicial y de las primeras dosis de encalado son mayores (pH - 0,5 pCa = 3,4 y pH + pH_2PO_4 = 11,0) aproximadamente en una unidad, que la serie Colorado (pH - 0,5 pCa = 2,5 y pH + pH_2PO_4 = 10,0) aún hasta la penúltima dosis. Considerando lo anterior y el hecho de que la solubilidad de los fosfatos está en estos casos influenciada mayormente por los incrementos en el pH, se comprende el diferente grado de solubilidad obtenido por el encalado en estas series.

Observando en conjunto los resultados obtenidos en todas estas series en lo que se refiere al efecto del encalado en las formas y solubilidad de los fosfatos del suelo, aparentemente se nota una contradicción, ya que no existe una tendencia hacia la formación predominante de fosfatos de calcio con el encalado y sí es notable la tendencia de la solubilidad de los fosfatos a la de la apatita hidroxidada. A este respecto, hay que señalar que de las reacciones de los fosfatos del suelo resultan productos intermedios complejos, los cuales no son bien definidos. Estos productos debido a su lenta reacción necesitan más tiempo para transformarse en un producto final definido. Lindsay y colaboradores (36), encontraron una serie de fosfatos diferentes como resultado de las reacciones entre los fosfatos aplicados y el suelo. La mayoría de estos fosfatos eran complejos y algunos no identificables. Esta puede ser una razón para que los resultados del fraccionamiento

por el método de Chang y Jackson (11),no concuerden totalmente con los resultados determinados a través de los diagramas de solubilidad.

En lo que se refiere a la solubilidad de los fosfatos, cabe mencionar según Ulrich (51), que la formación de la apatita hidroxidada a partir del fosfato de hierro se produce a un pH arriba de 5,8 con una concentración de calcio de 400 miligramos por litro.

Ulrich (51) ha presentado por otro lado la interpretación termodinámica de la transformación de fosfatos. Así representa la entropía (KCal) liberada en la hidrólisis de fosfatos de hierro, la formación de fosfatos de calcio (apatita hidroxidada) en función de pH - 0,5 pCa. A partir de valores de pH - 0,5 pCa de aproximadamente 4,5 (equivalente a pH de 6), se puede esperar la hidrólisis de fosfatos de hierro. Así los dos criterios arriba expuestos coinciden en sus implicaciones. Se podría esperar que en los suelos estudiados estas reacciones han ocurrido cuando los niveles de encalado fueron lo suficientemente altos para producir un aumento del pH a valores de alrededor de 6.

Esto ocurrió generalmente con la dosis de 8 a 16 meq (Ca + Mg), aunque en el suelo El Banco este efecto había sido logrado con la aplicación de 4 meq. (Ca + Mg). La importancia agronómica de la hidrólisis de los fosfatos de hierro y aluminio es obvia. Al producirse esta reacción aparecen iones $H_2PO_4^-$ en la solución del suelo; aumentando la actividad del fósforo en el suelo se producen condiciones más favorables para la nutrición fosfatada de las plantas y si este elemento nutritivo era limitante en

la producción, se producen también mejores condiciones para la misma.

C. Efecto del encalado en la fijación de fósforo.

En los cuadros 5, 6 y 7 están incluídos los resultados de la retención de fósforo en cada tratamiento en los suelos derivados de cenizas volcánicas aluviales y latosólicos respectivamente. Los valores están expresados en porcentajes del P aplicado.

1. Suelos derivados de cenizas volcánicas.

En los suelos derivados de cenizas volcánicas no se encontró ninguna asociación entre el encalado y el pH con la fijación de fósforo. La serie Birrisito alcanzó un valor de "R" de 0,737, pero no significativo estadísticamente.

Según los resultados de las determinaciones (Cuadro 5) se puede observar que ambos suelos tienen una alta capacidad de fijación de fósforo. Asímismo se observa en la serie Birrisito que en el tercer nivel de encalado (2 meq Ca + Mg/100 gr. de suelo) se obtiene el más bajo porcentaje de fijación (40,82%). En cambio en la serie Cervantes se obtiene entre el cuarto (44,80%) y quinto nivel (41,55%) de encalado. El alto contenido en materia orgánica y arcillas, en ambas series, interfieren el efecto del encalado. Estos resultados están relacionados con los resultados obtenidos por Fassbender et al (20) al correlacionar la fijación de P con las características del suelo.

2. Suelos aluviales.

En los suelos aluviales únicamente se encontró asociaciones significativas al encalado y al pH con el porcentaje de fijación de fósforo en la serie Juray (Cuadro 9). La correspondiente ecuación de regresión indica una tendencia a incrementar la fijación a medida que aumenta la dosis de encalado. Es de observar que el incremento total entre dosis extremas es moderado (8%). Este incremento, a igual que la mayor fijación de la serie Juray que en la de Banco, se debe a su mayor contenido en sesquióxidos, materia orgánica y arcilla (15). En la serie Banco se nota un decremento inicial en los tres primeros niveles de encalado (13,4% a 9,7%).

3. Suelos latosólicos.

La capacidad de fijación de estos suelos es mediana, un poco mayor para la serie Colorado (38%) que para la serie Paraíso (16%). No se encontró ninguna asociación significativa entre el porcentaje de fijación contra el encalado y el pH, en ambas series.

Las variaciones del porcentaje de fijación con respecto al encalado y al pH, son muy bajas sin mostrar una tendencia definitiva.

Sin embargo, se observa (Cuadro 7) que la fijación disminuye ligeramente (4%) en las dosis iniciales (1 o 2 meq) en ambas series. Esto es explicable si se consideran los cambios de los valores del pH, los cuales pueden estar influenciados principalmente la adsorción de los fosfatos, debido al alto contenido de

Al_2O_3 (17,10%), por ciento de carbono, (5,28%) y arcilla (86,0%) de estas series (15).

Aunque la mayoría de estos resultados no son fácilmente comparables con los de otros autores por diferencia en los métodos para determinar la fijación de fósforo, se puede deducir que la fijación ha sido poco afectada por el encalado o posiblemente porque el período de incubación fue muy corto.

Los resultados obtenidos por otros autores trabajando también en suelos de áreas tropicales han sido más concluyentes. Así Fox et al (22) han demostrado que en suelos de Hawaii la fijación de P disminuye a través del encalado. Estos resultados se esperaban también para las condiciones de los suelos estudiados, considerando que con el aumento de pH producido por el encalado disminuyen las cargas electropositivas del complejo coloidal al acercarse a su punto isoeléctrico y que los cationes desplazados del mismo complejo especialmente se reaccionan en la solución del suelo produciendo finalmente Al (OH3) inactivo. Sin embargo, la cinética de la reacción antes mencionada no es bien conocida, por ello sería factible que, como indicado anteriormente, con una incubación más larga se hubiera encontrado otros resultados.

D. Efecto del encalado en la producción y absorción de nutrimentos por las plantas.

En los Cuadros 11, 12 y 13 en el apéndice, se presentan los resultados analíticos del contenido de P, Ca y Al en el material vegetal y producción de materia seca, en los diferentes tratamientos en los

suelos derivados de cenizas volcánicas, aluviales y latosólicos. Se presentan, así mismo las relaciones P/Ca y P/Al de los nutrimentos absorbidos por la planta y los potenciales químicos determinados antes de la siembra y después de la cosecha. Los valores del contenido de nutrimentos en la parte aérea de la planta, está expresada en miligramos por kilo de suelo, la materia seca en gramos por kilo de suelo.

1. Producción de materia seca.

En los Cuadros 14, 15 y 16 se presentan las ecuaciones de regresión y los valores de "R" que alcanzaron niveles de significancia estadística, al correlacionar el peso de la materia seca, con el encalado y pH.

En las Figuras 7, 8, 9, 10, 11 y 12 se presentan gráficamente las correspondientes ecuaciones de regresión que alcanzaron un grado de asociación significativo con el encalado.

a. Suelos derivados de cenizas volcánicas.

En los suelos derivados de cenizas volcánicas se encontraron asociaciones significativas al correlacionar el encalado y el pH con la producción de materia seca, en ambas series. Como puede observarse en el Cuadro 14 los valores de "R" son 0,867* y 0,941** para la serie Birrisito y 0,857* y 0,903* para la serie Cervantes.

En las Figuras 7 y 8 pueden observarse gráficamente las tendencias según las correspondientes ecuaciones de regresión, con respecto al encalado para la serie Birrisito y Cervantes respectivamente.

Las tendencias indican una mayor producción de materia seca (5,92 gr y 6,44 en la serie Birrisito y Cervantes respectivamente) hacia niveles intermedios de encalado, 22 meq. (Ca + Mg)/ 100 gr de suelo, al cual corresponde un pH de 5,6 para la serie Birrisito 15,6 meq. (Ca + Mg) que corresponde a un pH de 5,8 para la serie Cervantes. Después de esos niveles óptimos decae la producción de materia seca, más abruptantemente en la serie Cervantes (hasta 2,9 gr) que en la serie Birrisito (a 5,2 grs).

b. Suelos aluviales.

En los suelos aluviales se encontraron asociaciones significativas estadísticamente entre el encalado y la producción de materia seca, en ambas series. Con respecto al pH y la producción de materia seca únicamente se encontró asociación significativa en la serie El Banco. Las ecuaciones de regresión y los respectivos valores de "R" se presentan en el Cuadro 15.

De acuerdo a las correspondientes ecuaciones de regresión, las tendencias en ambas series es diferente. En la serie El Banco, la producción de materia seca tiende a decrecer (de 8,7 a 3,3 g/Kg suelo) en una forma aproximadamente lineal, en cambio en la serie Juray se obtiene la producción máxima (6,7 gr/ Kg de suelo hasta la dosis de 13,5 meq de encalado). Sin embargo, la mayor producción de materia seca observada (Cuadro 12) en ambas series se obtiene a valores de pH de pH de 6,2 y 6,3 para la serie Banco y Juray respectivamente.

c. Suelos latosólicos.

En los suelos latosólicos se obtuvieron asociaciones significativas entre la producción de materia seca con el encalado y

el pH, en ambas series. Los valores de "R" tienen todos un nivel altamente significativo (Cuadro 16). Las correspondientes ecuaciones de regresión indican, sin embargo, tendencias diferentes para ambas series. La serie Colorado tiende a incrementar la producción de materia seca desde 0,5 a 7,5 g/kg de suelo hasta el nivel de 18 meq de (Ca + Mg), correspondiente a un pH de 5,9 después del cual declina hasta un valor de 3,55 gramos de materia seca por kilogramo de suelo, en la dosis máxima. En cambio en la serie Paraíso, hay una tendencia general a disminuir, la cual es muy notable después de la dosis de 4 meq de Ca + Mg. Corresponde a este nivel un pH de 5,7.

De acuerdo a los resultados presentados para todas las series de suelos se nota que la dosis óptima de encalado es aproximadamente de 16 meq (Ca + Mg) por 100 gramos de suelo, solamente las series Banco y Paraíso, tienen un efecto ligeramente negativo del encalado, lo cual se debe a sus valores iniciales de pH, mayores que los de las otras series.

Por otra parte, los altos valores de "R" encontrados nos indican una estrecha relación en la absorción en general, el encalado y el pH. Esto se discutirá más adelante junto con los resultados de la absorción del P y Ca.

2. Absorción de fósforo y calcio.

En los Cuadros 14, 15 y 16 se presentan también las ecuaciones de regresión y los correspondientes valores de "R" que alcanzaron niveles de significancia estadística, para suelos derivados de cenizas volcánicas, aluviales y latosólicos respectivamente,

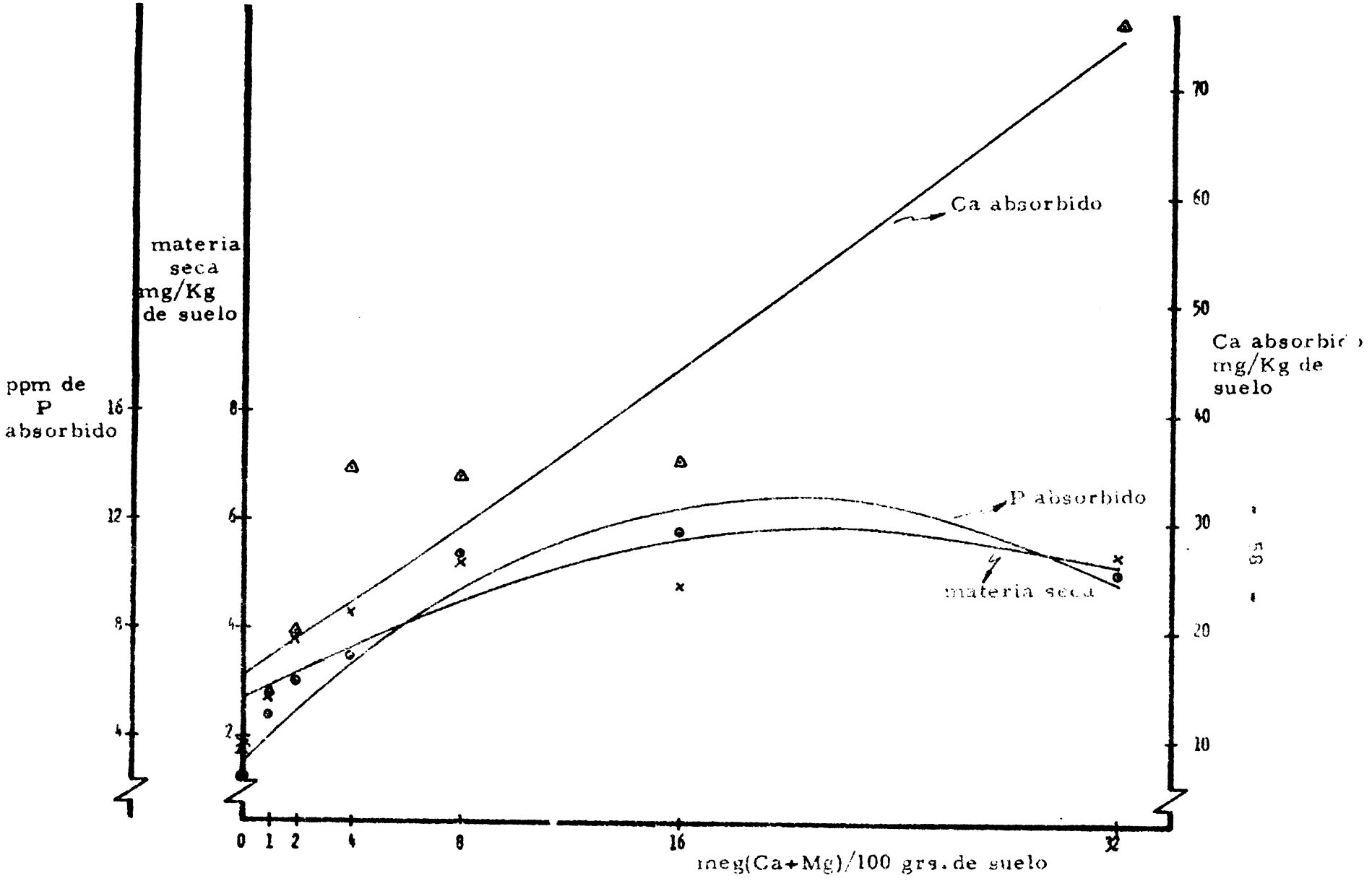

Fig. 7 Efecto del encalado sobre la producción de materia seca y absorción de P y Ca en el suelo Birrisito.

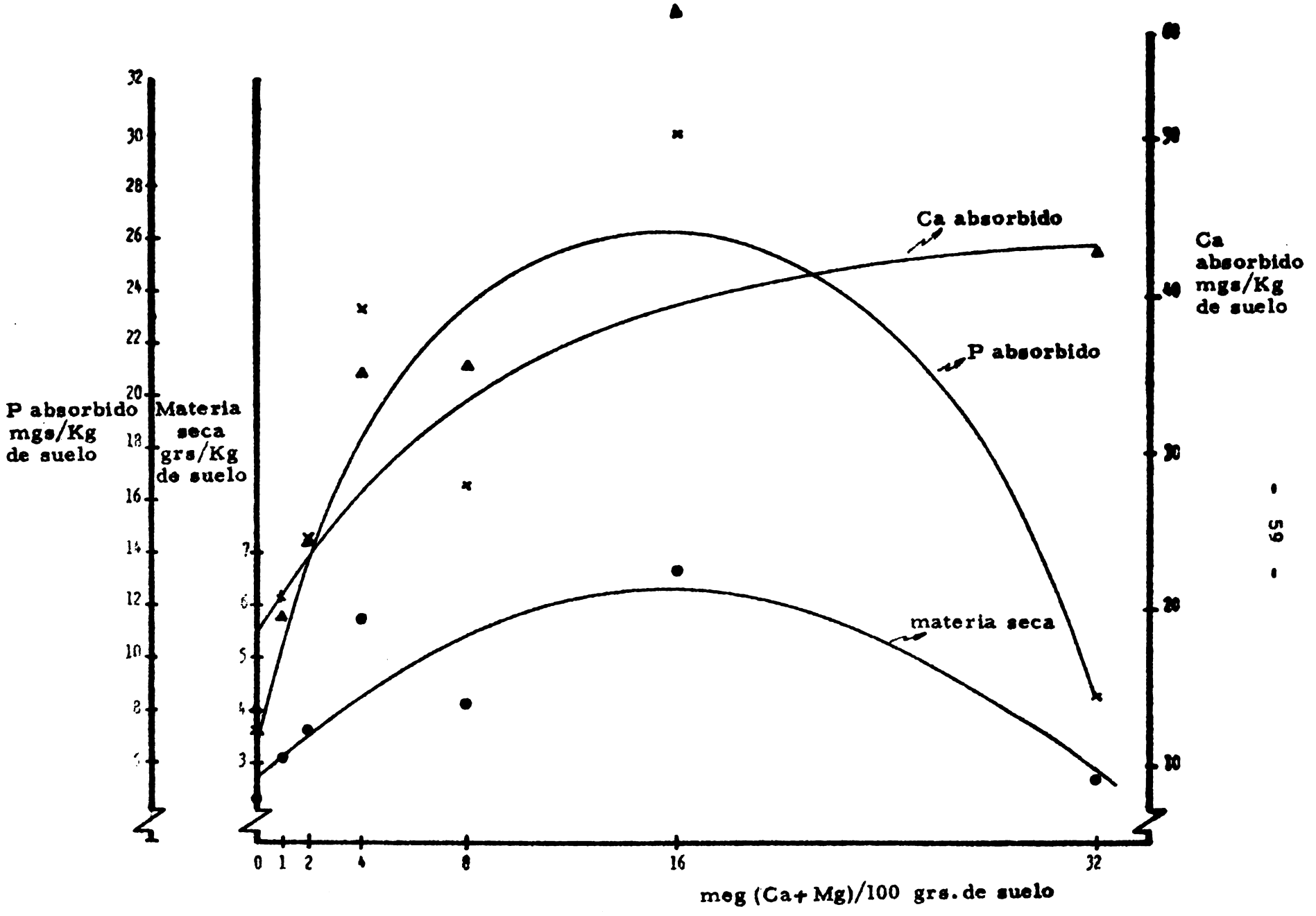

Fig. 8 Efecto del encalado sobre la producción de materia seca y absorción de P y Ca en el suelo Cervantes.

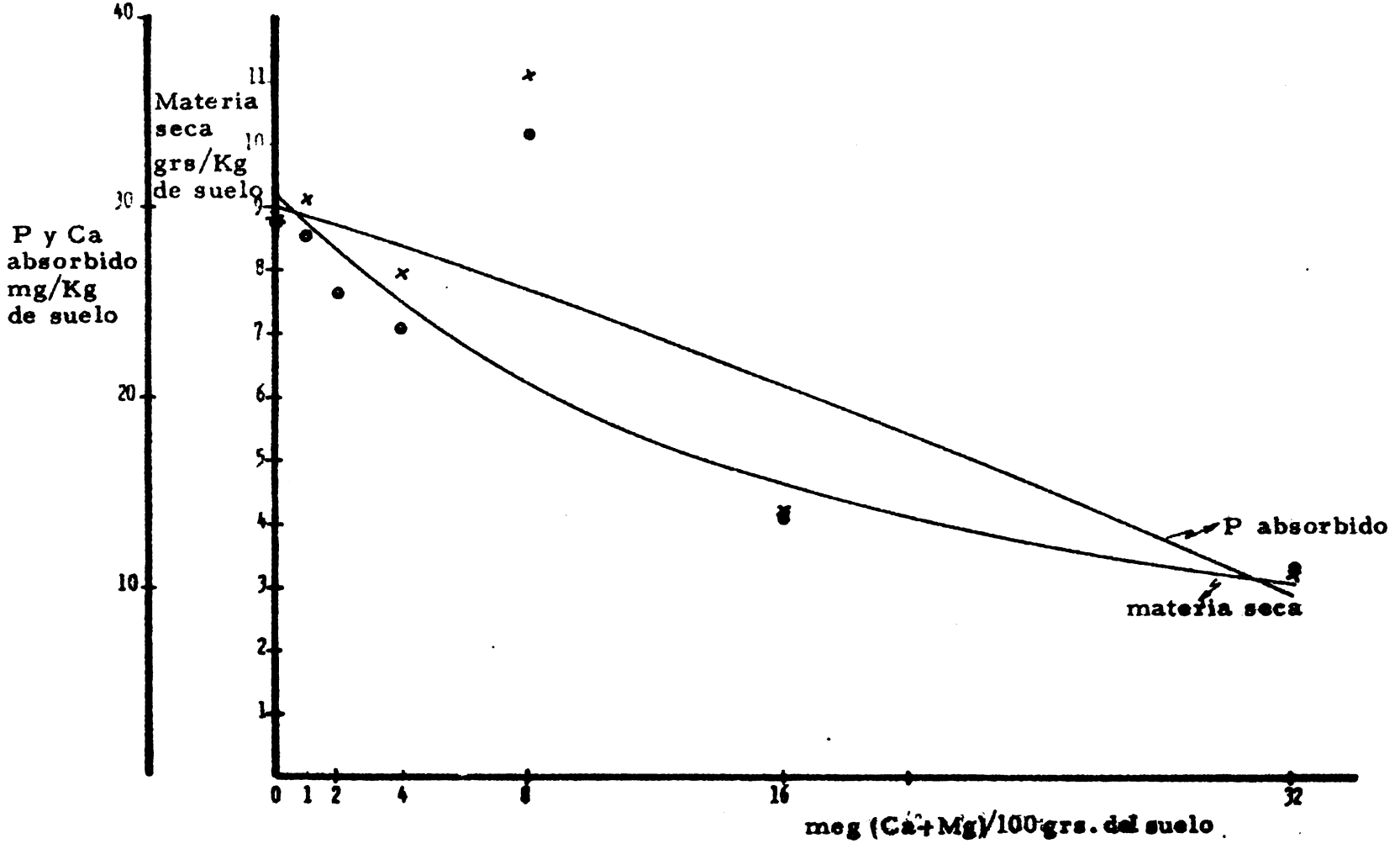

Fig. 9 Efecto del encalado sobre la producción de materia seca y absorción en el suelo El Banco.

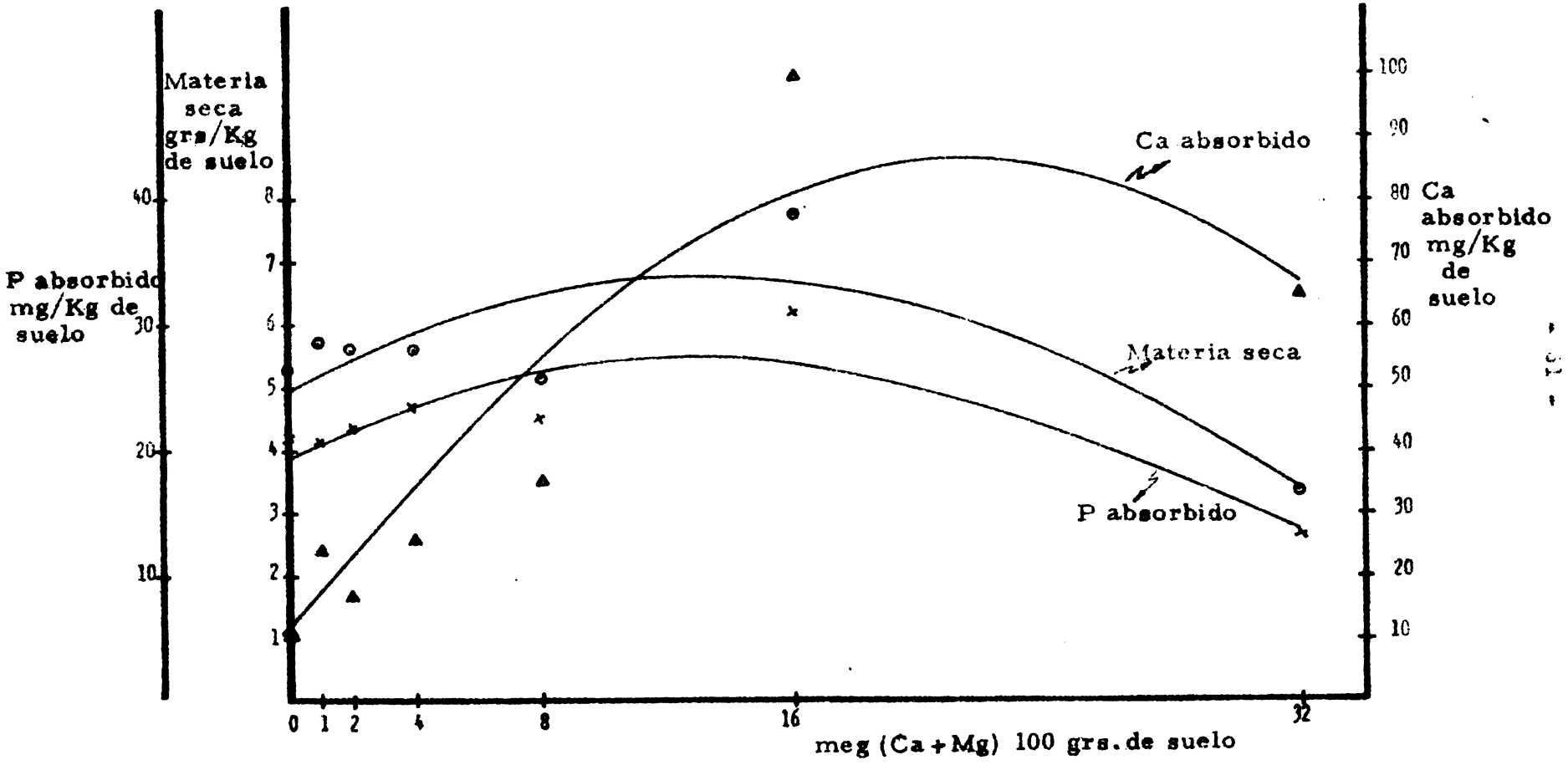

Fig. 10 Efecto del encalado sobre la producción de materia seca y absorción de P y Ca en el suelo Juray

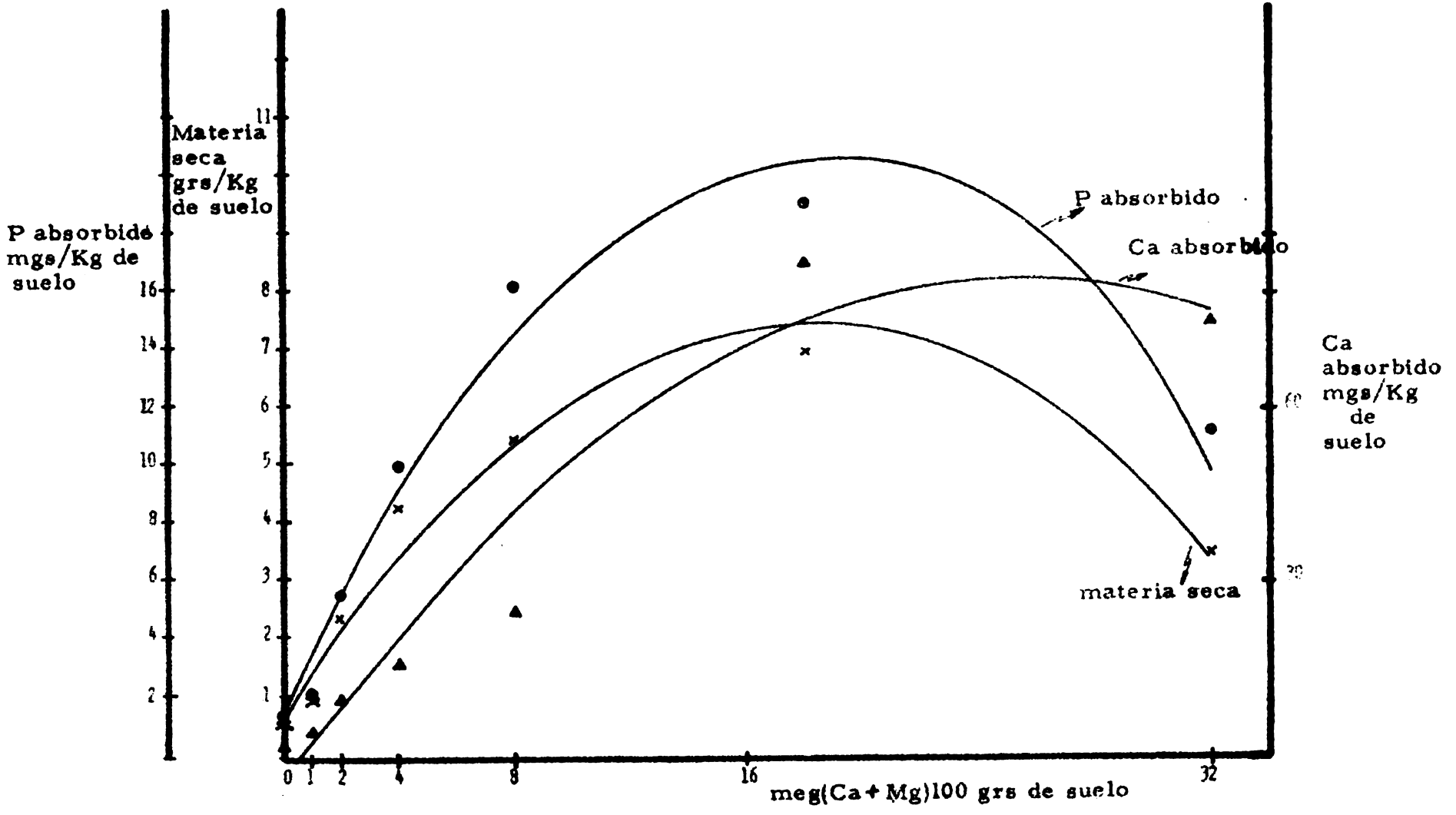

Fig.11 Efecto del encalado sobre la producción de materia seca y absorción de P y Ca en el suelo Colorado.

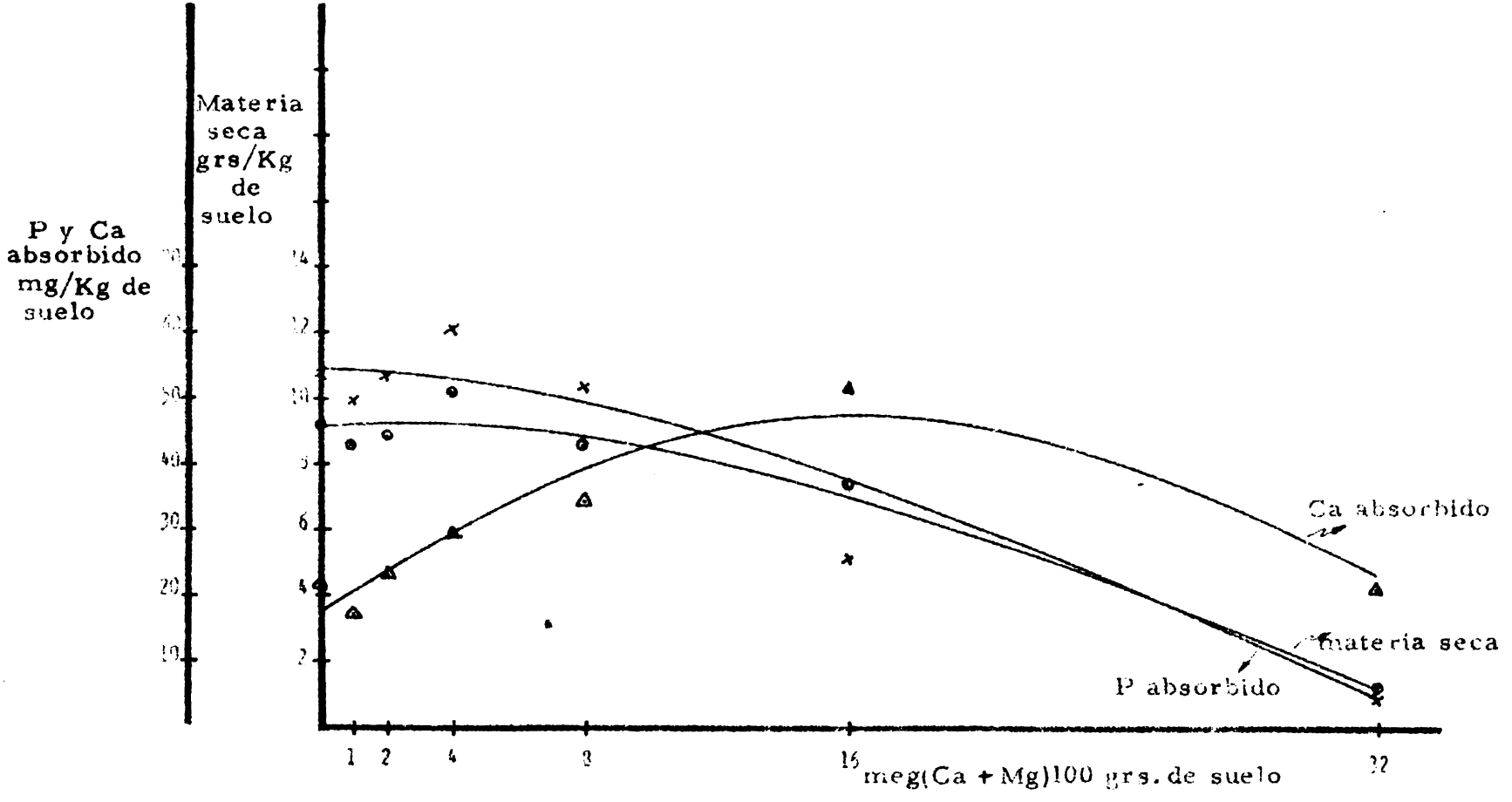

Fig. 12 Efecto del encalado sobre la producción de materia seca y absorción de P y Ca en el suelo Paraíso.

al correlacionar los contenidos de elementos nutritivos (P, Ca), con el encalado y el pH, los valores de pH son los determinados antes de la siembra. Asímismo, en las Figuras 7, 8, 9, 10, 11 y 12 se representan gráficamente las correspondientes ecuaciones de regresión cuadrática que alcanzaron un grado significativo de asociación con el encalado, para las diferentes series.

a. Suelos derivados de cenizas volcánicas.

En los suelos derivados de cenizas volcánicas se encontraron asociaciones altamente significativas, tanto para el encalado y el pH con la absorción de P y Ca (Cuadro 14). Las correspondientes ecuaciones de regresión cuadrática nos indican (Fig. 7 y 8) un incremento de la absorción del P (2,3 meq a 13,0 meq P/g suelo) hasta una dosis de 20,3 meq de Ca + Mg, la cual corresponde a un pH de 5,6 para la serie Birrisito; en la serie Cervantes el incremento es de 6,7 mg a 30,6 mg de P/g de suelo hasta la dosis de 16 meq. (pH = 5,8). Después de ese nivel de absorción de P decae hasta el valor máximo de la dosis de encalado y pH, este decaimiento es más abrupto para la serie Cervantes. Al respecto de la absorción de calcio, las tendencias (Fig. 7 y 8), en ambas series son diferentes. En la serie Birrisito tiende a incrementarse a medida que se incrementa el encalado hasta, la dosis máxima, en cambio en la serie Cervantes, la absorción de Ca se incrementa (13,4 mg P/kg de suelo) la dosis de 16 meq. de Ca + Mg.

De acuerdo a las tendencias mencionadas, es explicable el abrupto decaimiento de la absorción de P, en la serie Cervantes, ya

que se llega a un desbalance en la relación P/Ca y a que el cambio en pH es mayor que en la serie Birrisito. Las tendencias de producción de materia seca y P absorbido son muy idénticas en ambas series, lo cual indica una relación estrecha entre ambas.

b. Suelos aluviales.

En los suelos aluviales se encontraron asociaciones significativas entre la absorción de P con el encalado y el pH en ambas series. El calcio absorbido sólo se encontró asociado, estadísticamente significativo, con el encalado y pH en la serie Juray (Cuadro 15). Las tendencias presentadas gráficamente (Figs. 9 y 10) indican diferencias entre ambas series, para el caso de la absorción de P. En la serie El Banco dicha absorción tiende a disminuir (29,1 a 10,8 ppm) hacia las dosis mayores, aunque se obtiene una mayor absorción (36,9) en la dosis de 8 meq de (Ca + Mg), que corresponde a un pH de 6,2. En cambio en la serie Juray, la absorción de P se incrementa a un máximo (27,9 ppm) hasta la dosis de 14 meq. (pH = 6,3) para luego disminuir hacia la dosis máxima.

En el caso de la absorción de calcio se tuvo una máxima absorción (69,6 ppm) (Cuadro 12) según datos analíticos, en la dosis de 8 meq. (pH = 6,2) para el suelo El Banco y de 21,5 meq para el suelo Juray, en este último suelo se nota un incremento de la absorción (85,8 ppm) hasta dicha dosis, para luego decaer ligeramente en la dosis máxima.

Al considerar los valores del pH en las correspondientes dosis de encalado se puede explicar, en forma preliminar, el efecto

diferente del encalado en la absorción de P y Ca. Los valores iniciales de pH son de 5,7 y 5.0 para el suelo El Banco y Juray respectivamente. Los cambios de estos valores a través del encalado son crecientes en el suelo Juray, no así en el suelo El Banco, en el cual asciende únicamente hasta la dosis de 8 meq de Ca + Mg, a un valor de 6,2. Esto coincide con los resultados obtenidos por Fox y colaboradores (22) el cual concluye que el nivel óptimo de pH, está entre 5,0 y 6,0. Asímismo obtuvo una máxima absorción de P, en varias plantas a un pH alrededor de 5,6 a 5,7.

c. Suelos latosólicos.

En los suelos latosólicos se encontró asociados el encalado y el pH, la absorción del P y el Ca. Los valores de "R" fueron altamente significativos en ambos casos (Cuadro 16). Las ecuaciones de regresión cuadrática indican tendencias diferentes, en la absorción de P y Ca, en los dos suelos de este grupo. Con respecto a la absorción de P en el suelo Paraíso tiende a disminuir (53,6 a 5,7 ppm) a partir de las primeras dosis de encalado hasta la dosis máxima. En cambio, en el suelo Colorado, esta absorción, se incrementa hasta un máximo (21,1 ppm) que se obtiene en la dosis de 18,6 meq (Ca + Mg). Por otra parte, la absorción del calcio en el suelo Paraíso tiende a incrementarse (21,3 a 47,7 ppm) hasta la dosis de 16 meq. para luego disminuir (20,9 ppm) en la dosis máxima. En el suelo Colorado, se obtiene también esa tendencia inicial hasta la dosis de 25,5 meq; pero sin que decline fuertemente hacia la dosis máxima. Los valores de pH para las

máximas absorciones se obtuvieron a 5,9 para ambos nutrimentos, en el suelo Colorado, a 5,7 para el P y a 6,2 para el Ca en el suelo Paraíso. De acuerdo a las anteriores tendencias, se nota un efecto negativo del encalado, en la serie Paraíso a partir de la dosis de 4 meq (pH de 5,7), en cambio en la serie Colorado se tiene ese efecto a partir de la dosis de 16 meq (pH de 5,9). Paralelamente, al efecto del encalado en la absorción de P. se nota la misma tendencia de la producción de materia seca, lo cual indica una relación estrecha entre ambas, es también notable cierto antagonismo entre Ca y P., en estos suelos.

Una consideración conjunta de los tres grupos de suelos nos indica, en forma general, que la absorción óptima del P se obtiene a un pH entre 5,6 y 6,3 para la absorción de Ca, entre los valores 5,8 a 6,3. Estos valores difieren muy poco por los encontrados por Fox y colaboradores (22) utilizando suelos de Hawaii y otras plantas indicadoras. Si se comparan estos resultados con los encontrados sobre el efecto del encalado en las formas y solubilidad de fosfatos del suelo se puede concluir que la producción de materia seca y la absorción de P, Ca máximas coinciden con el punto en el cual se inicia la hidrólisis de fosfatos de hierro y aluminio. Así la producción del sistema suelo-planta está limitada cuando debido a la acidez del suelo se produce la formación de fosfatos de hierro y aluminio y llega a su máximo cuando en el sistema se libera energía.

La importancia agronómica de estos resultados es obvia. El encalado demuestra un efecto muy favorable sobre la producción en suelos ácidos. El conocimiento exacto de las circunstancias en

las cuales se produce ese aumento es de gran importancia ya que sobrepasándose el límite óptimo del encalado se produce un detrimento muy desfavorable de las cosechas. Muy frecuentemente se ha concluído en la literatura de los últimos decenios que el encalado de suelos tropicales no es aconsejable, ya que la aplicación de dosis alta, llevó al sobreencalado sin tenerse información adecuada.

Los resultados obtenidos más bien indican que su uso es favorable previo estudio específico de las circunstancias. Complementando los estudios aquí presentados deben hacerse experimentos de campo que corroboren los resultados.

3. Relaciones suelo-planta.

a. Antes de la siembra.

En el Cuadro 17 en el apéndice, se presentan las ecuaciones de regresión y los valores de R, en las asociaciones de niveles estadísticamente significativos, entre los potenciales químicos (pH_2PO_4 y pH_2PO_4 - 0,5 pCa) determinados en los suelos muestreados antes de la siembra y la producción de materia seca y absorción de P y Ca.

En suelos derivados de cenizas volcánicas únicamente se encontró asociación significativa entre el pH_2PO_4 - 0,5 pCa y el P absorbido ($R = 0,796^{*}$) en el suelo Birrisito. A mayores valores del potencial se tiene una mayor absorción de P. En la serie Cervantes los valores de R son muy bajos.

En los suelos aluviales se encontraron asociaciones significativas entre pH_2PO_4 con materia seca ($R = 0,970^{**}$) y P ($R = 0,973^{**}$)

absorbido (Cuadro 17), en el suelo Banco, entre pH_2PO_4 - 0,5 pCa con Ca (R = 0,821 R = 0,784) y P (0,964** y 0,789*) absorbido, en ambas series. Asímismo se obtuvo una asociación significativa entre pH_2PO_4 - 0,5 pCa con la producción de materia seca (R= 0,950**) en la serie Banco.

Las asociaciones anteriores indican en primer lugar la alta relación que existe entre la actividad iónica del P (pH_2PO_4) y el calcio (0,5 pCa) en la solución del suelo y la produoción de materia seca en estos suelos y absorción de P y Ca. A pesar de que el suelo Banco tiene una mayor concentración iónica de P que el suelo Juray, el desbalance con la concentración iónica del Ca, ha disminuído relativamente la absorción de P y aumenta la de Calcio. Ese desbalance es más notable en el suelo Juray aunque la absorción absoluta es mayor, el balance de ambas concentraciones en la mayor parte de los tratamientos resulta en una absorción progresiva hasta ciertos valores de estos potenciales.

En los suelos latosólicos se encontraron asociaciones estadísticamente significativas en ambas series. El potencial pH_2PO_4 - 0,5 pCa se encontró asociado significativamente con la producción de materia seca (0,920** y 0,980**) absorción de P (0,918** y 0,985**) y Ca (0,850* y 0,840*) en ambas series. En la serie Paraíso se encontraron también asociados el pH_2PO_4 con la materia seca (0,977**) y el P (0,962**) absorbido. Las diferentes ecuaciones de regresión y los respectivos valores significativos de R se presentan en el Cuadro 17.

De igual manera que en los suelos aluviales se nota las altas relaciones entre estos potenciales y la absorción de P y Ca.

Igualmente que el suelo Banco, se nota la misma situación para el suelo Paraíso. A medida que se incrementa la actividad iónica del Ca (0,5 pCa) y disminuye la del P (pH_2PO_4) se tiende a disminuir la absorción de ambos nutrimentos, mayormente para P.

Las relaciones presentadas en todos estos suelos indican que la absorción del P y Ca puede ser evaluada por estos parámetros, siendo mucho más estrecha la relación del potencial pH_2PO_4 - 0,5 pCa. En forma general los valores más altos de este potencial, que indican una mayor diferencia entre las actividades iónicas de estos elementos, tienden a una menor absorción en un mismo suelo.

b. Después de la cosecha.

Las ecuaciones de regresión cuadrática y los valores de R significativos de las diferentes correlaciones entre pH_2PO_4, pH_2PO_4 - 0,5 pCa, determinados después de cosechada la planta indicadora, contra la producción de materia seca, absorción de P y de Ca se presentan en el Cuadro 18, en el apéndice.

En los suelos derivados de cenizas volcánicas solamente se presentaron asociaciones en el suelo Birrisito. El pH_2PO_4 se encontró asociado significativamente únicamente con la absorción de Ca ($R = 0,784^{*}$). En cambio, el pH_2PO_4 - 0,5 pCa se encontró asociado significativamente con la producción de materia seca ($R = 0,863^{*}$) absorción de P y Ca ($0,890^{**}$ y $0,833^{*}$).

De acuerdo a las respectivas ecuaciones de regresión se nota, en el caso de el pH_2PO_4 con la absorción de Ca, una tendencia a una mayor absorción a medida que se incrementan los valores de

dicho potencial. Esto es explicable ya que disminuye la actividad iónica del P, luego se incrementa la del calcio. Con respecto al pH_2PO_4 - 0,5 pCa se nota una mayor producción de materia seca, absorción de P y Ca a medida que incrementan los valores de este potencial dentro de los valores encontrados.

En esta etapa del experimento es razonable esta relación ya que la absorción de los elementos por las plantas ha disminuído su concentración iónica en el suelo, mucho más para el P, luego los valores logarítmicos de la actividad iónica de éste serán mayores y asímismo la diferencia con el 0,5 pCa.

Respecto a los suelos aluviales únicamente se encontró asociaciones significativas entre el pH_2PO_4 - 0,5 pCa y la producción de materia seca (R = 0,758*) y absorción del P (R = 0,750*) en el suelo El Banco y con la absorción de Ca (0,815*) en el suelo Juray.

Las respectivas ecuaciones de regresión indican, en el caso del suelo El Banco, que a mayores valores del potencial pH_2PO_4 - 0,5 pCa la producción de materia y la absorción de P disminuye. Esto se explica si se considera que la actividad iónica del calcio aumenta, no así la del P que tiende a ser menor, luego las diferencias logarítmicas tienden a ser mayores. En el caso del suelo Juray, la tendencia es hacia una mayor absorción del Ca a medida que se incrementan los valores del potencial pH_2PO_4 - 0,5 pCa. Esto se explica igualmente por el incremento mayor de la concentración activa del Ca, lo cual provoca su mayor absorción.

En los suelos latosólicos se encontró asociaciones significativas entre los potenciales pH_2PO_4 y pH_2PO_4 - 0,5 pCa con

producción de materia seca y absorción de P en ambos suelos. En el suelo Colorado se obtuvo también asociación significativa entre ambos potenciales y la absorción de Ca ($R = 870^{*}$ y $R = 0,881^{**}$).

De acuerdo a la ecuación de regresión se nota una mayor producción de materia seca, de absorción de P y Ca, a medida que los valores de ambas potenciales aumentan, en el suelo Colorado. En cambio, en el suelo Paraíso, la producción de materia seca y la absorción de P disminuye al incrementar los valores de dichas potenciales.

Las anteriores tendencias indican que en el suelo Colorado la adición del material de encalado, principalmente por la adición de Ca, estableció un mejor balance de la relación P/Ca, todo lo contrario sucede en el suelo Paraíso, en el cual se produjo un desequilibrio.

En forma general, considerando las determinaciones de los potenciales químicos en ambas etapas no es notable una diferencia que indique una mejor evaluación entre unos y otros. Lo anterior se puede establecer a través de un estudio específico y a través de un diseño que permita un análisis estadístico para determinar diferencias significativas o no entre los factores o variables a considerar.

Los coeficientes altamente significativos obtenidos entre los diferentes potenciales y la respuesta del tomate (*Lycopersicum esculentum*) a la fertilización, indican la importancia agronómica de los parámetros de intensidad para la más adecuada interpretación de las relaciones suelo-planta. Estos resultados permiten las mismas deducciones indicadas por Fassbender (16) al discutir los trabajos en suelos tropicales de Ramamoorthy y Subramanian, Le Mare, Salmon y otros.

V. CONCLUSIONES

El efecto del encalado fue diferente para los seis suelos, dependiendo principalmente de su contenido inicial en sesquióxidos, materia orgánica, arcilla y grado de acidez.

La fijación de fósforo no varió significativamente con las diferentes dosis de encalado.

El efecto del encalado en las diferentes formas de fosfatos y en los diferentes suelos fue variable.

El uso de los diagramas de solubilidad permitió establecer mejor el estado de los fosfatos del suelo. Además ésto se complementó con el análisis del fraccionamiento de los fosfatos.

La solubilidad de los fosfatos fue incrementada con el encalado, principalmente por la elevación del pH en las dosis crecientes Ca + Mg aplicadas.

El efecto del encalado fue positivo incrementándose la producción de materia seca y la absorción de P.

El nivel óptimo de encalado para la producción de materia seca y absorción de P y Ca en plantas de tomate se obtuvo cuando el pH fue elevado a valores comprendidos entre 5,6 y 6,3.

Los potenciales químicos permiten describir el sistema suelo-planta indicando la actividad iónica y la absorción de los nutrimentos.

Comparativamente, los potenciales químicos determinados antes de la siembra y después de la cosecha no mostraron diferencias ostensibles en la evaluación de las relaciones suelo-planta.

VI. RESUMEN

Seis suelos encalados con dosis crecientes de carbonato de Ca + Mg (0, 1, 2, 4, 8, 16, 32 meq) e incubados durante cinco meses, se utilizaron para determinar las formas y fijación de fósforo y los potenciales químicos. Los suelos utilizados están clasificados como derivados de cenizas volcánicas, aluviales y latosólicos, todos fuertemente ácidos.

Con sub-muestras de los mismos suelos se estableció un experimento de invernadero, determinándose previo a la siembra, los potenciales químicos en el suelo ya fertilizado. A los 45 días después de la siembra se cosechó la parte aérea de la planta indicadora (Lycopersicum esculentum), se obtuvo la producción de materia seca, contenido de P y Ca. Después de la cosecha se determinó nuevamente, los potenciales químicos de los suelos. Con los resultados obtenidos en el suelo y en en el material vegetal, se efectuaron análisis de correlación y regresión.

Se utilizaron los diagramas de solubilidad de los fosfatos, de Ulrich y Kahna y de Lindsay y Moreno para establecer el efecto del encalado en la solubilidad de los fosfatos.

Se evaluaron las relaciones entre los potenciales y la absorción de P y Ca en las diferentes etapas del experimento de invernadero.

El encalado tuvo efectos diferenciales muy marcados en cada suelo. La influencia del encalado en las diferentes formas de fosfatos fue variable, sin embargo, la solubilidad de los mismos

fue incrementada hacia la solubilidad de la apatita hidroxidada. Esto fue influenciado principalmente por la variación del pH de los suelos. La fijación del fósforo no varió significativamente con las diferentes dosis de encalado. Se logró aumentos notables en la producción de materia seca y en la absorción de P y Ca. El nivel óptimo de encalado para la producción de materia seca y absorción de P y Ca, se obtuvo al elevar el pH del suelo a valores entre 5,6 y 6,3.

El uso de los potenciales químicos y la absorción de P y Ca permitió interpretar las relaciones suelo-planta, indicando la utilidad agronómica de los parámetros de intensidad.

No se detectaron diferencias entre los potenciales químicos determinados antes de la siembra y después de la cosecha, en la evaluación de las relaciones suelo-planta.

VII. SUMMARY

Six limed soils with increasing dosages of CO_3Ca/Mg (0, 1, 2, 4, 8, 16, 32 meq.) and incubated during five months, they were used to determine the forms and fixation of phosphorus and the chemical potentials. The soils used are clasified as derivated from volcanic ashes, alluvials and latosolics, all of them strongly acid.

With sub-samples of the same soils an experiment in the green house was established, determing previous planting, the chemical potentials in the soil already fertilized. 45 days after planting the aereal part of the control plant (Lycopersicum esculentum) was harvested, it was obtained the production of dry matter, the P and Ca containe. After harvesting, it was again determined, the chemical potencials of the soils. With the results obtained in the soil and the plant material, analysis of correla-- tion and regression were perfomed.

Diagrams of solubility of fosfates of Ulrich and Kahna and of Lindsay and Moreno were used, to established the liming effect in the solubility of fosfates.

The relation between the potentials and the absortion of P and Ca were evaluated in the different steps of the green house experiment.

The liming process had differential effects very prominents in each soil. The influence of liming was in the different forms of fosfates variables, however, their solubility was increased

toward the solubility of hydroxyapatite. This was mainly in-- fluenced by the variation of the pH of the soils. The fixation of phosphorus didn't change significantly with the different dosa ges of lime. It was obtained remarkable increases in the production of dry matter and in the absortion of P and Ca. The optimun level of lime for the production of dry matter and absortion of P and Ca was obtained when the pH was increased between 5.6 and 6.3.

The use of the chemical potentials and the absortion of P and Ca allowed to interpret the soil-plant relationships, showing the agronomical use of parameters of intensity.

Differences between the chemical potentials, determined before planting and after harvesting, were not noted in the evaluation of the soil-plant relationships.

VIII. BIBLIOGRAFIA

1. ADAMS, F. y PEARSON, R.W. Crop response to lime in the southern U.S. and Puerto Rico. In Pearson, R.W. y Adams, F. ed. Soil acidity and liming. Wisconsin, American Society of Agronomy, 1967. pp. 161-186.

2. ASLYNG, H.C. Lime and phosphate potentials of soils, the solubility and avoilability of phosphates. Royal Veterinarian Agricultural College, Copehnhagen Yearbook, 1954. pp. 1-50.

3. AWAN, A.B. Effect of lime on availability of phosphorus in Zamorano soils. Soil Science Society of America. Proceedings 28 (5): 672-673.

4. BARBER, S.A. Liming materials. In Pearson, R.W. y Adams, F. ed. Soil acidity and liming. Madison Wisconsin, American Society of Agronomy, 1967. p. 125.

5. BARROW, N.J. Relationships between uptake of phosphorus by plants and the phosphorus potentials and buffuing capacity and the supply of potasium to plants. Australian Journal of Agricultural Research, 17:849-861. 1966.

6. BLACK, C.A. Soil plant relationships. New York, John Wiley, 1957. 332 p.

7. _____ y GORING, C.A.I. Organic phosphorus in soils. In Pierre W.H. y Norman, A.G. ed. Soil and fertilizers phosphorus. New York, Academic Press, 1953. pp.123-152.

8. BONNET, J.A. et.al. Tracing the mineral from the soil to the plant to the animal blood. Journal Agricultural University of Puerto Rico. 30:(3):138-183. 1946.

9. BORNEMISZA, E. El fósforo orgánico en suelos tropicales. Turrialba, (Costa Rica) 16 (1): 33-38. 1966.

10. CHANG, S.C., CHU, W.K. y ERH, K.T. Determination of reductant soluble phosphate in soils. Soil Science 102 (1):44-45. 1966.

11. CHANG, S.C., y JACKSON, M.L. Fractionation of soil phosphorus. Soil Science 84:133-144. 1957.

12. _____ y JACKSON, M.L. Soil phosphorus fractions in some representative soils. Journal of Soil Science 9(1:109-119. 1958.

13. DAHNKE, W.C., MALCOLM, J.L. y MENENDEZ, M.E. Phosphorus fractions in selected soil profiles of El Salvador as related to their development. Soil Science 98:33-39. 1964.

14. DONDOLI, C.B. y TORRES, J.A. Estudio geoagronómico de la región oriental de la Meseta Central. San José, Costa Rica, Ministerio de Agricultura e Industrias, 1954. 175 p.

15. 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.

16. _____ Conceptos fisicoquímicos en la interpretación del sistema suelo-planta. Congreso Latinoamericano de Química, 10: , San José, Costa Rica, 1969. (En imprenta).

17. _____ Deficiencias y fijación de fósforo en suelos derivados de cenizas volcánicas en América Central. In Panel sobre Suelos Derivados de Cenizas Volcánicas de América Latina, Turrialba, Costa Rica, Julio 6-13, 1969. Trabajos. Turrialba, Costa Rica, Instituto Interamericano de Ciencias Agrícolas, 1969. p. B.4.1 - B.4-10.

18. _____ Efecto del encalado en la mejor utilización de fertilizantes fosfatados en un andosol de Costa Rica. Fitotecnia Latinoamericana 6(1): 115-127. 1969.

19. _____ é IGUE, K. Comparación en estudios sobre retención y transformación de fosfatos en el suelo. Turrialba, (Costa Rica) 17(3): 284-287. 1967.

20. _____ MULLER, L. y BALERDI, F. Estudio del fósforo en suelos de América Central. II. Formas y sus relaciones con las plantas. Turrialba,(Costa Rica) 18(3): 33-47. 1968.

21. FISKELL, J.G.A. y SPENCER, W.F. Forms of phosphate in lakeland fine sand after six years of heavy phosphate and lime applications. Soil Science 97: 320-327. 1955.

22. FOX, R.L., DEDATTA, S.K. y WANG, J.K. Phosphorus solubility and availability to plants and the aluminium status of Hawaiian soils as influence by liming. International Society of Soil Science. Transaction of joint Meeting. Commissions IV and V. New Zealand, 1962. 574-583.

23. FRIED, M. y DEAN, L.A. Phosphate retention by iron and aluminium in cation exchange system. Soil Science Society America. Proceedings 19: 143-147. 1955.

24. GREENE, H. Fertilizers prospects in Africa. Transactions 5th International Congress Soil Science. El Congo, 1962. pp. 146-174.

25. HAAS, B. Etude des differents formes des phosphates inorganiques dansles sols de Hongrie. ith Int. Congress of Soil Science, Bucharest. Romania, 1964.

26. HALSTEAD, R.L., LAPENSEE, J.M. é IVARSON, K.C. Mineralization of soil organic phosphorus with particular reference to the effect of lime. Canadian Journal of Soil Science 43: 97-106. 1963.

27. HARDY, F. Soils of the IAIAS area. Turrialba, Costa Rica, Instituto Interamericano de Ciencias Agrícolas, 1961. 76 p. (Mimeografiado).

28. HASEMAN, J.F., BROWN, E.H. y WHITT, C.D. Some reactions of phosphate with clays and hydrous oxides of iron and aluminium. Soil Science 70: 257-271. 1950.

29. HEMWALL, J.B. The fixation of phosphorus by soils. Advances in agronomy 9: 95-112. 1957.

30. HSM, P.H. y JACKSON, M.L. Inorganic phosphate transformations by chemical weathering in soils as influenced by pH. Soil Science 90: 16-24. 1960.

31. JACKSON, W.A. Phisical effect of soil acidity. In Pearson, R.W. y Adams F. ed. Soil acidity and liming. Madison, Wisconsin, American Society of Agronomy, 1967. pp.43-66.

32. JACOBS, T. Aspects du l'adsorption des anions phosphoriques á la surface il in hematite (Fe_2O_3). 8th Int. Congress of soil Science. Bucharest, Romania, 1964. pp. 501-507.

33. KURTZ, L.T. Inorganic phosphorus in acid and neutral soils. In Pierre, W. H. y Norman, A.G. ed. Soil and fertilizer phosphorus. New York, Academic Press, 1953. pp. 59-88.

34. LAROCHE, F.A. Efeitos do calagem sobre o complexo de troca de un latosolo tropical e os teores de cations absorvidos pelo tomate. Tesis de grado. IICA, Turrialba, Costa Rica, 1967.

35. LAWTON, K. y DAVIS, J.F. The effect of liming on the utilization of soil and fertilizer phosphorus by several crops grown on acid organic soils. Soil Science Society of American Proceedings 20: 522-526. 1956.

36. LINDSAY, W.L. y MORENO, E.C. Phosphate phase equilibrium in soils. Soil Science Society of American Proceedings 24: 117-182. 1960.

37. McLEAN, E.O. Aluminium. In Black, C.A. et al. ed. Methods of soils analysis. Wisconsin, American Society of Agronomy, 1965. pp. 978-997.

38. MORILLO, Z., M.R. Evaluación de los recursos edafológicos de la cuenca baja del Río Choluteca, Hondura. Tesis Magister Scientae. Turrialba, Costa Rica, Instituto Interamericano de Ciencias Agrícolas, 1967. 120 p.

39. MURRMANN, R.P. y PEECH, M. Effect of pH on labile and solu-- ble phosphate in soils. Soil Science Society of American Proceedings 33(2): 205-210. 1969.

40. _____ y PEECH, M. Relative significance of labile and crystaline phosphotes in soils. Soil Science 107(4): 249-255. 1969.

41. OLSEN, S.R. y FRIED, M. Soil phosphorus and fertility. In USDA. Soil, yearbook of agriculture. Washington, D.C. USDA. 1957. p. 94-100.

42. PIÑERES, E. Efecto del encalado sobre el pH, las bases cambiables y el aluminio extraíble en seis suelos de Costa Rica. Tesis de grado. Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica, 1969. 33 p.

43. RIOS, V., MARTINI, J.A. y TEJEIRA, R. Efecto del encalado sobre acidez y el contenido de aluminio y hierro extraíble en nueve suelos de Panamá. Turrialba, (Costa Rica) 18(2): 39-146. 1968.

44. SAUCHELLI, V. Manual on phosphates in agriculture. Baltimore, Davison Chemical Corporation, 1951. 176 p.

45. SERBANESCU, J. et al. Les differentes formes du phosphore et quelques aspects du la fixation du phosphates dans les sols de Roumanie. 8th International Congress. Bucharest, Romania, 1964.

46. SHERMAN, G.D. y CHU, A.C. Diferential fixation phosphate by typical soils of the Hawaiian great soils groups. Hawaii Agricultural Experimental Station. Technical Bulletin 16. 20 p.

47. SPENCER, W. F. Efects of heavy application of phosphate and lime on nutrient uptake, growth, freeze injure, and root distribution of grapefruit trees. Soil Science 89(5): 311-318. 1960.

48. TAYLOR, A.W., GURNEY, E.L. y LINDSAY, W.L. An evaluation of some iron and aluminium phosphates as sources of phosphate for plants. Soil Science 90: 25-31. 1960.

49. THOMPSON, L.M., BLACK, C.A. y ZEELINER, J.A. Occurrence and mineralization of organic phosphorus in soils, with particular reference to associations with nitrogen, carbon and pH. Soil Science 77: 185-196. 1954.

50. TRICANICO, S.A. A calagem nos solos dos climas tropicais e sub tropicais umidos. Revista de Agricultura (Piracicaba, Brasil) 37(1): 171-179. 1962.

51. ULRICH, B. Boden und Pflanzen. Ihre Wechselbesiuhungen in physikalish chemischer Betrachtung. Stuttgar, Ferdinand Enke Verlag, 1961. 114 p.

52. _____, HEMPLER, K. y BENZLER, J.H. Zur analitischen Bestimmung von Gesamptphosphorsaure und laktatlöslicher Phosphorsäure in Bodenproben. Die Phosphrsäure 20: 344-347. 1960.

53. _____ y KHANNA, P.K. Schofield'sche Potentiale und Phosphatformen in Böden. Geoderma 2(1): 65-78. 1968.

54. VENEMA, K.C.W. Some observations of yield depressions caused by normal fertilizer dessings, Potsh and Tropical Agriculture 3(3): 39-52. 1960.

55. VOLK, G.M. Top Liming pastures-effect of efficiency of nitrogen fertilizers Research Report 7(4): 8-9. 1962.

56. WIKLANDER, L. Cation and anion exchange phenomeno. In Bear F.E., ed. Chemistry of soil Znd. ed. New York, Reinhold, 1964. pp. 163-205.

IX. A P E N D I C E

CUADRO N- 5

EFECTO DEL ENCALADO SOBRE EL pH, FORMAS Y FIJACION DE P EN LOS SUELOS BIRRISITO Y CERVANTES

Tratamiento meq (Ca+Mg)	pH ($CaCl_2$)	P NH_4Cl (ppm de P)	P de Al (ppm de P y % de P activo)	P de Fe (ppm de P y % de P activo)	P de Ca (ppm de P y % de P activo)	P Activo (ppm de P y % de P total)	P Ocluidos (ppm)	P Sol Red. (ppm)	P Inorgánico (ppm y % de P total)	P Orgánico (ppm y % de P total)	P Total (ppm)	P Fijado (%)
BIRRISITO												
0	4,2	0,3	67,18	47,00	11,1	125,61	34,0	316,0	475,61	1134,39	1610	
			53,48	37,42	8,84	7,78			29,6	69		51,25
1	4,3	1,0	43,30	61,90	10,3	116,50	27,1	237,1	380,70	1129,30	1510	
			37,17	53,13	8,84	7,76			25,6	73,8		66,27
2	4,4	1,5	55,5	69,8	12,7	139,50	38,6	353,6	531,70	1048,30	1580	
			39,78	50,04	9,10	8,88			33,6	64,4		40,82
4	4,7	1,0	63,4	61,2	12,6	138,20	38,2	293,7	470,10	1139,90	1610	
			45,88	44,28	9,12	8,6			29,2	69,5		53,13
8	5,1	0,6	51,7	64,1	10,3	126,70	33,6	237,8	398,10	1171,9	1570	
			40,81	50,59	8,13	8,07			25,15	74,6		73,25
16	5,7	1,4	49,5	74,5	10,4	135,80	37,3	304,2	477,30	1152,7	1630	
			36,45	54,86	7,66	8,33			29,2	70,6		69,64
32	6,0	0,7	68,5	94,7	11,3	175,20	37,2	329,2	541,60	988,4	1530	
			39,10	54,05	6,45	11,45			35,20	64,6		41,28
CERVANTES												
0	5,1	0,3	61,8	63,6	246,5	372,2	13,1	300,7	686,0	1497,0	2183	
			16,60	17,09	66,23	17,0			31,4	68,6		75,78
1	5,1	0,3	68,5	70,3	233,0	373,1	10,7	275,0	657,8	1525,0	2182	
			18,41	18,89	62,62	17,1			30,1	69,9		59,73
2	5,2	0,4	71,8	77,1	218,1	367,4	10,6	308,5	686,5	1470,0	2156	
			19,54	20,99	59,86	17,0				68,2		74,72
4	5,3	0,3	68,9	89,9	224,7	383,8	15,5	253,9	653,2	1729,0	2382	
			17,95	23,42	58,55	16,1				72,6		44,80
8	5,5	0,3	69,7	76,7	222,3	369,0	12,8	372,7	654,5	1578,0	2232	
			18,89	20,79	60,24	16,5				70,7		41,55
16	5,7	0,3	70,0	92,2	185,9	348,4	10,4	248,7	607,5	1651,0	2258	
			20,09	26,46	53,36	15,4				73,1		79,16
32	6,3	0,4	58,6	115,0	182,7	356,7	11,2	312,2	680,1	1537,0	2217	
			16,43	32,24	52,48	16,1				69,0		80,62

CUADRO Nº 6

EFECTO DEL ENCALADO SOBRE EL pH, FORMAS Y FIJACION DE P EN LOS SUELOS BANCO Y JURAY

Tratamiento meq (Ca+Mg)	pH ($CaCl_2$)	P NH_4Cl (ppm de P)	P de Al (ppm de P y % de P activo)	P de Fe (ppm de P y % de P activo)	P de Ca (ppm de P y % de P activo)	P Activo (ppm de P y % de P total)	P Ocluidos (ppm)	P Sol. Red. (ppm)	P Inorgánicos (ppm y % de P total)	P Orgánico (ppm y % de P total)	P Total ppm	P Fijado (%)
BANCO												
0	5,2	2,35	17,5	107,1	25,5	152,45	71,5	336,4	558,35	372,0	930	
			11,48	70,25	16,73	16,4				40,0		13,38
1	5,6	2,64	18,22	107,7	27,4	154,96	76,9	401,3	633,16	302,0	935	
			11,76	69,50	17,04	16,6				32,3		9,69
2	5,7	2,96	18,5	109,9	32,8	164,06	70,9	275,4	510,96	440	950	
			11,28	66,99	19,99	17,3				46,3		9.79
4	6,3	3,2	21,9	113,4	39,7	178,2	62,7	309,3	550,2	385,0	935	
			12,29	63,64	22,21	19,1				41,2		13,59
8	6,1	2,9	19,1	111,3	49,9	183,25	68,4	376,8	628,45	257,0	885	
			10,42	60,74	27,28	20,7				29,0		12,90
16	6,6	4,8	16,9	108,2	44,2	174,07	61,8	390,0	626,07	249,0	875	
			9,71	62,16	25,35	19,9				28,5		11,83
32	6,9	4,9	17,5	109,7	49,6	181,71	61,9	407,5	651,11	294,0	945	
			9,63	60,37	27,3	19,2				31,1		11,80
JURAY												
0	4,4	1,4	84,5	430,5	61,5	577,9	117,6	160,4	855,9	1439,6	2295,5	
			14,62	74,49	10,64	25,2				62,7		20.07
1	4,4	1,6	10,21	406,9	71,3	581,9	109,0	159,6	850,5	1418,9	2269,4	
			17,55	69,93	12,25	25,6				62,5		21,63
2	4,8	1,6	73,7	502,9	64,1	642,3	114,9	104,5	861,7	1373,3	2235	
			11,47	78,30	9,98	28,7				61,4		20,27
4	5,2	1,4	68,7	436,0	61,1	567,2	111,0	105,7	783,9	1598,5	2382	
			12,11	76,87	10,77	23,8				67,1		19,51
8	5,8	1,4	75,5	386,8	59,2	522,9	99,0	166,7	788,6	1563,3	2352	
			14,44	73,97	11,32	22,2				66,5		23,05
16	6,1	1,8	75,9	406,8	60,6	545,1	105,3	155,9	806,3	1623,9	2430	
			13,92	78,63	11,12	22,4				66,8		26,05
32	6,6	1,7	86,3	401,4	71,1	560,5	109,3	115,8	785,6	1526,4	2312	
			15,40	71,61	12,69	24,2				66,0		28,09

CUADRO Nº 7

EFECTO DEL ENCALADO SOBRE EL pH, FORMAS Y FIJACION DE P EN LOS SUELOS COLORADO Y PARAISO

Tratamiento meq (Ca+Mg)	pH ($CaCl_2$)	P NH_4Cl (ppm de P)	P de Al (ppm de P y % de P activo)	P de Fe (ppm de P y % de P activo)	P de Ca (ppm de P y % de P activo)	P Activo (ppm de P y % de P total)	P Ocluidos (ppm)	P Sol. Red. (ppm)	P Inorgánicos (ppm y % de P total)	P Orgánico (ppm y % de P total)	P Total (ppm)	P Fijado (%)
COLORADO												
0	3,7	2,7	74,9	149,7	13,4	240,7	69,5	253,3	545,3	484,5	1030	
			31,12	62,19	5,57	23,3			52,9	47,0		37,77
1	4,1	3,3	69,4	138,7	10.5	221,88	60,7	209,4	491,98	469,02	961	
			31,28	62,51	4,73	23,0			51,2	48,9		38,13
2	4,1	2,0	62,4	148,5	11,9	224,8	57,3	275,7	557,8	557,2	1115	
			27,76	66.06	5,29	20,2			50,3	49,65		34,52
4	4,4	3,5	52,6	141,0	14,2	211,3	64,1	184,6	460,0	590,0	1050	
			24,89	66,73	6,72	19,05			43,8	56,2		39,55
8	5,1	1,3	48,0	152,1	13,3	214,7	69,4	213,4	497,5	447,5	945	
			22,36	70,84	6,19	21,2			52,6	47,4		36,60
16	5,8	1,3	43,0	146,6	20,2	211,06	69,8	222,4	503,26	576,74	1080	
			20,37	69,46	9,57	19,55			46,5	53,4		10,42
32	6,3	1,6	54,3	146,3	21,5	223,67	74,7	312,8	611,17	388,83	1000	
			24,28	65,41	9,61	22,36			61,12	38,88		38,74
PARAISO												
0	4,9	2,0	36,7	149,1	91,9	279,7	73,9	415,3	768,9	801,1	1570	
			13,12	53,31	32,80	17,8				51,0		16,25
1	5,2	2,1	35,4	177,0	85,8	300,3	69,5	383,4	753,2	993,8	1747	
			11,79	58,94	28,57	17,2				56,9		14,82
2	5,3	1,5	37,1	143,2	92,9	274,7	65,0	422,0	761,7	778,3	1540	
			13,51	52,13	33,82	17,8				50,5		13,40
4	5,4	1,4	29,5	137,3	84,5	252,7	59,5	352,5	664,7	945,3	1610	
			11,67	54,33	33,44	15,7				58,7		24,04
8	6,4	1,5	39,8	124,7	87,8	253,8	59,2	436,6	749,6	819,4	1569	
			15,68	49,13	34,59	16,2				52,2		25,08
16	6,6	1,5	38,2	132,6	90,8	263,1	59,9	378,9	701,9	1019,1	1721	
			14,52	50,40	34,51	15,3				59,2		20,47
32	6,8	0,9	49,3	102,1	103,0	255,3	65,9	297,9	619,1	986,9	1606	
			19,31	39,99	40,34	15,9				61,5		24,08

CUADRO Nº8. Ecuaciones de regresión y valores R entre encalado y pH contra formas de P en los suelos Birrisito y Cervantes.

	X	Y	Ecuación de Regresión	R
BIRRISITO				
	Encalado	P de Fe	$57,34 + 1,10\ x + 0,001x^2$	$0,906^{**}$
	Encalado	P Orgánico	$1101,75 + 9,96x - 0,42x^2$	$0,857^{*}$
	pH	P de Fe	$234,12 - 83,52\ x + 9,92x^2$	$0,865^{*}$
CERVANTES				
	Encalado	P de Al	$66,25 + 0,78x - 0,032x^2$	$0,848^{*}$
	Encalado	P de Fe	$70,78 + 1,53x - 0,005x^2$	$0,918^{**}$
	Encalado	P de Ca	$239,04 - 4,12x + 0,073x^2$	$0,938^{**}$
	Encalado	% P de Al	$17,56 + 0,31\ x - 0,011x^2$	$0,821^{*}$
	Encalado	% P de Fe	$18,72 + 19,13\ x - 0,003x^2$	$0,951^{**}$
	pH	P de Al	$-588,91+237,81x - 21,436x^2$	$0,846^{*}$
	pH	P de Fe	$-110,47+34,62x + 0,169x^2$	$0,919^{**}$
	pH	P de Ca	$1611,88 - 449,42x + 34,299x^2$	$0,911^{**}$
	pH	% P de Fe	$-62,53 + 19,77x - 0,753x^2$	$0,945^{**}$

* Significativo al 5%

** Significativo al 1%

CUADRO Nº9. Ecuaciones de regresión y valores R entre encalado y pH contra formas y fijación de P en los suelos Banco y Juray.

X	Y	Ecuación de Regresión	R
BANCO			
Encalado	P Sol. NH_4Cl	$2,41 + 0,17x - 0,003x^2$	$0,945^{**}$
Encalado	P de Ca	$27,85 + 2,25 - 0,05x^2$	$0,888^{**}$
Encalado	% P de Al	$11,92 - 0,18x + 0,003x^2$	$0,882^{**}$
Encalado	% P de Fe	$69,05 - 0,92x + 0,021x^2$	$0,896^{**}$
JURAY			
Encalado	P de Ca	$65,81 - 0,93x + 0,034x^2$	$0,760^{*}$
Encalado	P Orgánico	$1413,08 + 24,84x - 0,669x^2$	$0,820^{*}$
Encalado	P - Fijado	$19,80 + 0,44x - 0,005x^2$	$0,948^{**}$
pH	P de Al	$572,32 - 181,84x + 16,44x^2$	$0,850^{*}$
pH	P de Ca	$281,74 - 82,01x + 7,56x^2$	$0,767^{*}$
pH	P Orgánico	$-1102,31 + 905,06x - 76,27x^2$	$0,804^{*}$
pH	P - Fijado	$79,92 - 24,92x + 2,60x^2$	$0,960^{**}$

* Significativo al 5%

** Significativo al 1%

CUADRO Nº10. Ecuaciones de regresión y valores R, entre encalado y pH con formas de fósforo en los suelos Colorado y Paraíso.

	X	Y	Ecuación de Regresión	R
COLORADO				
	Encalado	P de Al	$70,80 - 3,44x + 0,092x^2$	$0,952^{**}$
	Encalado	P de Ca	$11,32 + 0,58x - 0,008x^2$	$0,930^{**}$
	Encalado	% P de Al	$30,84 - 1,24x + 0,032x^2$	$0,965^{**}$
	Encalado	% P de Fe	$62,95 + 0,96x - 0,028x^2$	$0,906^{**}$
	pH	P de Al	$361,36 - 116,69x + 10,75x^2$	$0,956^{**}$
	pH	P de Ca	$43,70 - 15,62x + 1,94x^2$	$0,938^{**}$
	pH	% P de Al	$120,51 - 35,72x + 3,22x^2$	$0,926^{**}$
	pH	% P de Fe	$-32,52 + 39,01x - 3,71x^2$	$0,908^{**}$
PARAISO				
	Encalado	P Sol. NH_4Cl	$1,84 - 0,04x + 0,0003x^2$	$0,821^{*}$
	Encalado	P de Al	$35,44 - 0,03x + 0,014x^2$	$0,862^{*}$
	Encalado	P de Fe	$155,46 - 2,63x + 0,03x^2$	$0,825^{*}$
	Encalado	P de Ca	$89,59 - 0,43x + 0,026x^2$	$0,885^{**}$
	Encalado	% P de Al	$12,56 + 0,14x + 0,002x^2$	$0,900^{**}$
	Encalado	% P de Fe	$54,91 - 0,33x - 0,004x^2$	$0,902^{*}$
	pH	P de Al	$382,85 - 124,37x + 11,02x^2$	$0,869^{*}$
	pH	P de Fe	$-149,34 + 122,65x - 12,4x^2$	$0,803^{*}$
	pH	P de Ca	$552,37 - 163,13 + 14,19x^2$	$0,815^{*}$
	pH	% P de Al	$120,50 - 39,48x + 3,59x^2$	$0,903^{**}$
	pH	% P de Fe	$-167,28 + 81,35x - 7,42x^2$	$0,864^{*}$

* Significativo al 5%

** Significativo al 1%

CUADRO Nº 11 ANALISIS DEL MATERIAL VEGETAL, PRODUCCION DE MATERIA SECA Y POTENCIALES QUIMICOS DETERMINADOS ANTES DE LA SIEMBRA Y DESPUES DE LA COSECHA EN LOS SUELOS: BIRRISITO Y CERVANTES.

Tratamiento meq (Ca+Mg)	pH	Materia seca gr/Kg suelo	P mg/Kilo de suelo	Ca mg/Kilo de suelo	Al mg/Kilo de suelo	P/Al	P/Ca	ANTES DE LA SIEMBRA			DESPUES DE LA COSECHA	
								pH_2PO_4	pH_2PO_4-0.5 pCa	pH_2PO_4-0.33 pAl	pH_2PO_4	pH_2PO_4-0.5 p Ca
BIRRISITO												
0	4,8	1,81	2,58	8,37	0,011	110	0,31	4,96	3,15	3,31	5,82	3,77
1	4,9	2,77	4,85	14,01	0,017	286	0,35	4,85	3,01	3,20	5,72	3,66
2	5,1	3,87	6,11	19,71	0,022	278	0,31	4,82	2,96	3,17	5,82	3,84
4	5,2	7,00	7,00	35,00	0,057	126	0,20	4,82	3,05	3,14	---	---
8	5,2	5,26	10,92	34,34	0,083	131	0,32	5,42	3,72	3,67	5,96	4,05
16	5,6	4,84	11,72	35,69	0,137	86	0,32	5,17	3,46	3,47	5,85	4,11
32	6,0	5,44	10,21	76,25	0,211	48	0,13	5,10	3,53	3,28	---	---
CERVANTES												
0	5,1	2,23	6,69	13,45	0.014	470	0,50	5,66	4,00	3,97	5,92	3,85
1	5,2	3,11	12,29	19,38	0,012	1020	0,63	5,57	3,99	3,92	5,03	3,05
2	5,3	3,61	14,65	23,95	0,023	640	0,61	5,47	3,87	3,82	5,17	3,24
4	5,4	5,77	23,37	34,75	0,066	360	0,68	5,51	3,93	3,81	5,41	3,32
8	5,5	4,11	16,63	35,32	0,051	326	0,47	5,62	4,20	3,87	---	---
16	5,8	6,72	30,58	62,58	0,237	129	0,48	5,77	4,39	3,99	5,51	3,69
32	6,5	2,72	8,31	42,89	0,058	146	0,19	5,89	4,54	4,07	5,51	3,92

CUADRO Nº 12 ANALISIS DEL MATERIAL VEGETAL, PRODUCCION DE MATERIA SECA Y POTENCIALES QUIMICOS DETERMINADOS ANTES DE LA SIEMBRA Y DESPUES DE LA COSECHA EN LOS SUELOS: BANCO Y JURAY

Tratamiento meq (Ca+Mg)	pH	Materia seca gr/Kg suelo	P	Ca	Al	P/Al	P/Ca	ANTES DE LA SIEMBRA			DESPUES DE LA COSECHA	
			mg/Kilo de suelo					pH_2PO_4	pH_2PO_4-0.5 p Ca	pH_2PO_4-0.33 p Al	pH_2PO_4	pH_2PO_4-0.5 p Ca
BANCO												
0	5,7	8.75	29,31	24,77	0,031	945,48	0,84	4,89	3,18	3,13	---	---
1	5,6	8,55	30,35	36,55	0,022	1379,54	0,83	4,80	3,15	2,99	4,64	2,18
2	5,5	7,62	25,92	35,65	0,028	925,71	0,73	4,64	3,08	2,83	4,72	2,40
4	5,6	7,05	26,44	46,00	0,105	251,81	0,57	4,68	3,18	2,86	4,64	2,50
8	6,2	10,12	36,96	69,61	0,151	244,75	0.53	4,80	3,39	2,95	4,92	2,86
16	6,7	4,10	13,74	40,17	0,089	154,38	0,34	5,05	3,62	3,67	5,17	3,56
32	7,1	3,32	10,80	44,89	0,071	152,11	0,24	5,09	3,76	3,17	4,92	3,26
JURAY												
0	5,0	5,20	20,95	10.14	0,026	805,77	2,07	5,32	3,45	3,67	5,02	2,92
1	5,0	5,67	20,54	23,50	0,024	855,83	0,87	5,24	3,41	3,61	5,35	3,35
2	5,4	5,57	21.58	16,09	0,025	863,20	1,34	5,19	3,31	3,51	5,31	3,29
4	5,5	5,57	23,14	25,09	0,064	361,56	0,92	5,20	3,42	3,45	5,42	3,28
8	5,5	5,17	22,36	34,67	0,044	508,18	0,64	5,39	3,87	3,53	5,12	3,14
16	6,3	7.70	30.80	99,32	0,140	220,00	0,31	5,38	3,92	3,47	5,46	3,83
32	7,1	3,30	13.14	64,02	0,081	162,22	0,20	5.57	4,27	3,65	5,62	4,14

CUADRO Nº 13 ANALISIS DEL MATERIAL VEGETAL, PRODUCCION DE MATERIA SECA Y POTENCIALES QUIMICOS DETERMINADOS ANTES DE LA SIEMBRA Y DESPUES DE LA COSECHA EN LOS SUELOS COLORADO Y PARAISO.

Tratamiento meq (Ca+Mg)	pH	Materia seca gr/Kg suelo	P	Ca	Al	P/Al	P/Ca	ANTES DE LA SIEMBRA			DESPUES DE LA COSECHA	
			mg/Kilo de suelo					pH_2PO_4	pH_2PO_4-0.5 p Ca	pH_2PO_4-0.33 p Al	pH_2PO_4	pH_2PO_4-0.5 p Ca
COLORADO												
0	4,4	0,55	1,03	2,07	0,003	343,33	0,50	5,16	2,76	3,68	---	---
1	4,5	1,00	2,18	4,55	0,008	272,50	0,48	5,04	2,67	3,33	5,14	2,81
2	4,7	2,42	5,64	10,07	0,016	352,50	0,56	4,96	2,74	3,25	5,12	3,21
4	4,9	4,32	10,05	16,22	0,063	159,52	0,62	5,09	3,21	3,35	5,48	3,60
8	5,1	5,47	16.26	25,60	0,085	191,29	0,64	5,01	3,34	3,28	5,28	3,45
16	5,9	7,05	19,14	85,30	0,179	106,93	0,22	5,09	3,45	3,39	5,64	3,80
32	6,7	3,55	11,24	75,44	0,088	127,73	0,15	5,38	3,92	3,56	5,52	4,02
PARAISO												
0	5,2	9,19	53,65	21,36	0,035	1532,86	2,51	5.05	3,29	3,35	---	---
1	5,3	8,56	49,49	17,34	0,030	1649,67	2,85	5,00	3,22	3,29	4,74	2,22
2	5,4	8,81	53,05	23,14	0,043	1233,72	2,29	4,96	3,19	3,24	4,74	2,22
4	5,7	10,12	60,25	29,76	0,105	573,81	2,02	4,92	3,19	3,17	---	---
8	5,8	8,56	51.80	34,16	0,098	528,57	1,52	4,92	3,35	3,09	4,74	2,49
16	6,2	7,46	25,83	51,94	0,139	257,77	0,69	5.08	3,73	3,16	5,21	3,32
32	7,2	1,37	5,71	20,97	0,028	203,93	0,27	5,47	4,14	3.50	5,21	3,67

CUADRO Nº14. Ecuaciones de regresión y valores R entre encalado y pH con la producción de materia seca, absorción de P y Ca en los suelos Birrisito y Cervantes.

X	Y	Ecuación de Regresión	R
BIRRISITO			
Encalado	Materia seca	$2,707 + 0,291x - 0,0066x^2$	0,867*
Encalado	P absorbido	$3,73 + 0,929x - 0,0229x^2$	0,968**
Encalado	Ca absorbido	$15,612 + 1,736x + 0,0034x^2$	0,946**
Encalado	Al absorbido	$0,01 + 0,001x - 0,0001x^2$	0,998**
pH	Materia seca	$-130,96 + 47,738x - 4,17x^2$	0,941**
pH	P Absorbido	$-345,35 + 125,24x - 10,99x^2$	0,924**
pH	Ca absorbido	$164,44 - 98,28x + 13,825x^2$	0,951**
pH	Al absorbido	$0,24 - 0,23x + 0,037x^2$	0,982**
CERVANTES			
Encalado	Materia seca	$2,702 + 0,4568x - 0,014x^2$	0,857*
Encalado	P absorbido	$9,285 + 2,388x - 0,07533x^2$	0,881**
Encalado	Ca absorbido	$14,308 + 4,592x - 0,115x^2$	0,966**
Encalado	Al absorbido	$-0,01 + 0,02x - 0,001x^2$	0,867*
pH	Materia seca	$-256,26 + 89,98x - 7,71x^2$	0,903**
pH	P absorbido	$-1346,08 + 471,62x - 40,49x^2$	0,914**
pH	Ca absorbido	$-2028,35 + 693,22x - 57,59x^2$	0,955**

* Significativo al 5%

** Significativo al 1%

CUADRO Nº15. Ecuaciones de regresión y valores de R entre encalado y pH con la producción de materia seca, absorción de P y Ca en los suelos El Banco y Juray.

	X	Y	Ecuación de Regresión	R
BANCO				
	Encalado	Materia seca	$8,71 - 0,19x + 0,001x^2$	0,815*
	Encalado	P absorbido	$30,31 - 0,55x - 0,002x^2$	0,794*
	pH	Materia seca	$-169,53 + 59,71x - 4,99x^2$	0,874**
	pH	P absorbido	$-668,95 + 233,83x - 19,51x^2$	0,874**
JURAY				
	Encalado	Materia seca	$4,992 + 0,25x - 0,009x^2$	0,833*
	Encalado	P absorbido	$19,300 + 1,22x - 0,043x^2$	0,907**
	Encalado	Ca absorbido	$4,945 + 7,63x - 0,178x^2$	0,919**
	Encalado	Al absorbido	$0,01 + 0,01x - 0,0002x^2$	0,873**
	pH	P absorbido	$-286,18 + 105,40x - 8,88x^2$	0,815*
	pH	Ca absorbido	$-947,66 + 303,06x - 22,44x^2$	0,840*
	pH	Al absorbido	$-1,65 + 0,54x - 0,04x^2$	0,846*

* Significativo al 5%

** Significativo al 1%

CUADRO Nº16. Ecuaciones de regresión y valores de R entre encalado y pH con la producción de materia seca, absorción de P y Ca en los suelos Colorado y Paraíso.

	X	Y	Ecuación de regresión	R
COLORADO				
	Encalado	Materia seca	$0,80 + 0,74x - 0,020x^2$	$0,980^{**}$
	Encalado	P absorbido	$1,39 + 2,11x - 0,056x^2$	$0,985^{**}$
	Encalado	Ca absorbido	$-4,33 + 6,88x - 0,135x^2$	$0,961^{**}$
	pH	Materia seca	$-116,73 + 43,03x - 3,74x^2$	$0,994^{**}$
	pH	P absorbido	$-315,5 + 115,43x - 9,95x^2$	$0,984^{**}$
	pH	Ca absorbido	$-575,93 + 189,70x - 13,67x^2$	$0,957^{**}$
PARAISO				
	Encalado	Materia seca	$9,03 + 0,053x - 0,009x^2$	$0,984^{**}$
	Encalado	P absorbido	$54,53 - 0,28x - 0,039x^2$	$0,975^{**}$
	Encalado	Ca absorbido	$16,56 + 3,72x - 0,111x^2$	$0,954^{**}$
	pH	Materia seca	$-72,60 + 29,73x - 2,70x^2$	$0,982^{**}$
	pH	P absorbido	$-329,16 + 144,40x - 13,62x^2$	$0,964^{**}$
	pH	Ca absorbido	$-934,85 + 311,84x - 24,84x^2$	$0,895^{**}$

* Significativo al 5%

** Significativo al 1%

CUADRO Nº17. Ecuaciones de regresión y valores de R entre potenciales y Producción de materia seca, absorción de P y Ca, determinados antes de la siembra.

	X	Y	Ecuación de regresión	R
BIRRISITO				
	pH_2PO_4-0,5 pCa	P absorbido	$0,821-4,788x + 2,087x^2$	0,796*
CERVANTES			Ninguna significativa	
BANCO	pH_2PO_4	Materia seca	$-1826,21+76,44x-79,39x^2$	0,970**
	pH_2PO_4	P absorbido	$-6658,99+2785,35-289,84x^2$	0,973**
	pH_2PO_4-0,5 pCa	Materia seca	$-386,48+237,14x - 35,50x^2$	0,950**
	pH_2PO_4-0,5 pCa	Ca absorbido	$-2820,94+1668,66x - 241,36x^2$	0,821*
	pH_2PO_4-0,5 pCa	P absorbido	$-1580,19+964,24x -143,94x^2$	0,964**
JURAY				
	pH_2PO_4-0,5 pCa	Ca absorbido	$-1356,94+683,00x -81,76x^2$	0,784*
	pH_2PO_4-0,5 pCa	P absorbido	$-584,67+327,75x -43,92x^2$	0,789*
COLORADO				
	pH_2PO_4-0,5 pCa	Materia seca	$-95,07+58,51x -8,49x^2$	0,920**
	pH_2PO_4-0,5 pCa	Ca absorbido	$-115,15+29,50x + 5,26x^2$	0,850*
	pH_2PO_4-0,5 pCa	P absorbido	$-246,89 + 150,05x -21,43x^2$	0,918**
PARAISO				
	pH_2PO_4	Materia seca	$-432,38 + 183,39x -19,03x^2$	0,977**
	pH_2PO_4	P absorbido	$-2,72 + 106,21x -19,14x^2$	0,962**
	pH_2PO_4-0,5 pCa	Materia seca	$-104,07 + 68,94x -10,49x^2$	0,980**
	pH_2PO_4-0,5 pCa	P absorbido	$-296,26 + 234,64x -39,05x^2$	0,985**
	pH_2PO_4-0,5 pCa	Ca absorbido	$-1514 + 849,72x -115,59x^2$	0,840*
	pH_2PO_4-0,33 pAl	Materia seca	$-864,22 + 544,73x -34,92x^2$	0,906**
	pH_2PO_4-0,33 pAl	P absorbido	$-5207,69 + 3280,53x -511,35x^2$	0,854*

* Significativo al 5%

** Significativo al 1%

CUADRO Nº18. Ecuaciones de regresión y valores R entre potenciales y producción de materia seca, absorción de P y Ca, determinados después de la cosecha.

	X	Y	Ecuación de regresión	R
BIRRISITO				
	pH_2PO_4	Ca absorbido	$55,649 - 109,68x + 17,84x^2$	0,784*
	pH_2PO_4-0,5 pCa	Materia seca	$4,87 - 7,09x + 1,74x^2$	0,863*
		P absorbido	$8,60 - 19,75x + 4,98x^2$	0,890**
		Ca absorbido	$55,65 - 77,12x + 17,61x^2$	0,833*
CERVANTES			Ninguna significativa	
BANCO	pH_2PO_4-0,5 pCa	Materia seca	$8,69 + 2,24x - 1,01x^2$	0,758*
	pH_2PO_4-0,5 pCa	P absorbido	$29,03 + 10,02x - 4,096x^2$	0,740*
JURAY	pH_2PO_4-0,5 pCa	Ca absorbido	$-436,78 + 213,25x - 21,41x^2$	0,815*
PARAISO	pH_2PO_4	Materia seca	$9,655 + 7,77x - 1,78x^2$	0,791*
	pH_2PO_4	P absorbido	$58,99 + 57,22x - 12,32x^2$	0,875**
	pH_2PO_4-0,5 pCa	Materia seca	$9,59 + 2,26x - 1,1x^2$	0,895**
	pH_2PO_4-0,5 pCa	P absorbido	$56,71 + 15,60x - 7,50x^2$	0,948**
COLORADO	pH_2PO_4	Materia seca	$0,549 - 6,28x - 1,28x^2$	0,834*
	pH_2PO_4	P absorbido	$0,997 - 18,03x - 3,69x^2$	0,818*
	pH_2PO_4	Ca absorbido	$2,138 - 125,80 - 24,60x^2$	0,870*
	pH_2PO_4-0,5 pCa	Materia seca	$0,47 - 1,24x + 0,64x^2$	0,767*
	pH_2PH_4-0,5 pCa	P absorbido	$0,81 - 4,57x + 2,11x^2$	0,788*
	pH_2PO_4-0,5 pCa	Ca absorbido	$2,65 - 54,76x + + 18,25x^2$	0,881**

* Significativo al 5%

** Significativo al 1%

Date Due

~~NOV 27 1985~~
30 OCT 1987
13 NOV 1987
27 NOV 1987
27 NOV 1987
~~25 SEP 1996~~
24 OCT 1996
05 NOV 1996
27 NOV ~~1996~~ DEVUELTO
09 ENE 1997
~~23 ENE 1997~~
06 FEB 1997 DEVUELTO
07 FEB 1997