

14403

CENTRO DE DOCUMENTACION

RESPUESTA DIFERENCIAL DE OCHO GRAMINEAS FORRAJERAS A ESTRES DE
AL Y P EN UN OXISOL DE CARIMAGUA, COLOMBIA*

José G. Salinas y Guido Delgadillo**

14403

RESUMEN

La toxicidad de Al y la deficiencia de P ocurren frecuentemente en los Oxisoles del trópico, limitando la productividad de especies forrajeras. La selección de especies tolerantes a dichas condiciones adversas debe considerarse como una alternativa para utilizar estas extensas áreas con mínimo uso de insumos. Se estudió la respuesta diferencial de ocho gramíneas forrajeras al estrés de Al y/o P en el suelo. El experimento fue establecido en 1977 en un Oxisol de Carimagua (Haplustox Típico, arcilloso, caolinítico, isohipertérmico). Para obtener una saturación de Al equivalente a 90, 85, 75 y menos de 20%, se aplicaron 0, 0,5, 1,0 y 5,0 ton cal/ha y para obtener 1,5, 3, 9 y >30 ppm de P disponible (Bray II) en el suelo, se aplicaron 0, 17, 117 y 277 kg de P/ha, como superfosfato triple. Los resultados indican que varias gramíneas forrajeras bajo condiciones minerales limitantes pueden sobrevivir y/o producir. Se consideró que solamente la habilidad de una gramínea forrajera para sobrevivir en suelos ácidos no tiene valor si la producción es baja y que la producción absoluta indica el potencial de una especie forrajera para producir en condiciones adversas. De aquí que rendimientos relativos y rendimientos absolutos fueron considerados como criterios

* Trabajo a presentarse en el VII Congreso Latinoamericano de la Ciencia del Suelo, Heredia, Costa Rica, Junio 30-Julio 4, 1980

** CIAT, Programa de Pastos Tropicales, Apartado Aéreo 6713, Cali, Colombia.

BIBLIOTECA

17 OCT. 1980

útiles en la respuesta diferencial de estas gramíneas. Se estimó que una producción de materia seca que no excedió al 50% de su rendimiento máximo, es determinante de la condición de "supervivencia" o "producción relativa baja" (PRB). Cuando el rendimiento relativo estuvo entre 50 y 80% de ese máximo, se consideró a la planta en condición de "producción relativa media" (PRM) y finalmente, por encima del 80% del rendimiento máximo, en condición de "producción relativa alta" (PRA) bajo estrés de Al y/o P. El límite superior se fijó en 80%, debido a que en la mayoría de los casos por encima de este porcentaje, la tasa de incremento en producción de materia seca por unidad de insumo aplicado (cal y/o fósforo) fue relativamente baja y no significativa. Los resultados, con este criterio, muestran una respuesta diferencial de *Andropogon gayanus*, *Brachiaria humidicola*, *Brachiaria decumbens*, *Hyparrhenia rufa*, *Melinis minutiflora*, *Digitaria decumbens*, *Panicum maximum* y *Pennisetum purpureum*, a estrés de Al y/o P. La respuesta de varias gramíneas al encalado fue al primer incremento de cal (0,5 ton/ha), de donde se dedujo que la respuesta fue relativa a nutrición de calcio y que junto con el primer incremento de la fertilización fosforada (17 kg de P/ha) determinaron que varias gramíneas pasen a una condición de "producción relativa media" y "producción relativa alta".

INTRODUCCION

Una estrategia para la producción de ganado de carne en América tropical, es el desarrollo de una tecnología de producción de forrajes en suelos ácidos y de baja fertilidad natural (CIAT, 1978). De aquí, dos componentes de esta estrategia resaltan en la producción de pasturas y son, el factor suelo (suelo ácido e infértil) y el factor planta (germoplasma forrajero). El principio de esta estrategia es incorporar el factor planta como participante directo en el complejo de infertilidad de los suelos ácidos de América tropical. En muchos casos, la selección de especies forrajeras para suelos ácidos de baja fertilidad natural puede resultar más económica que modifi-

car la fertilidad del suelo ácido para establecer pasturas.

Respecto al factor suelo, durante los últimos años se ha enfatizado el estudio de la distribución geográfica y propiedades de los suelos en América tropical y un resultado de estos estudios es el mapa tentativo presentado por Sánchez y Cochrane (1979). Los Oxisoles y Ultisoles representan los órdenes más extensos, cubriendo el 56% de la superficie de América tropical en las zonas de tierras bajas (0-900 m) y zonas intermedias (900-1800 m). De esta manera, estas áreas constituyen un bloque extenso de tierra, siendo la mayoría potencialmente arable. A pesar de la favorable extensión, localización y topografía de estos suelos, el desarrollo agropecuario en estas áreas presenta ciertas limitaciones. Uno de los principales obstáculos para la producción de cultivos y/o pasturas es la baja fertilidad natural del suelo. La mayoría de los suelos del trópico americano presenta un "complejo de infertilidad", el cual identifica una deficiencia general de varios macro y micronutrientes, alta acidez y toxicidades de Al y/o Mn (Spain, 1976; Salinas, 1979a).

La toxicidad de Al es uno de los factores prominentes que limita el desarrollo agrícola en la mayoría de estos suelos. Altos niveles de saturación de Al reducen el crecimiento radicular inhibiendo su elongación y penetración en el suelo y consecuentemente, reduciendo los sitios de absorción de agua y nutrientes, así como también la utilización de éstos en el subsuelo (Salinas, 1979a; Gualdrón y Spain, 1979). En una segunda fase, el Al obstaculiza la translocación de varios nutrientes a la parte aérea, los cuales se manifiestan como deficiencias nutricionales principalmente de P, Ca y Mg (Heylar, 1978; Andrew y Vanden Berg, 1973; Salinas, 1978). Todos estos efectos de Al se reflejan en un descenso de la productividad de los cultivos. Otra importante limitación en Oxisoles y Ultisoles de América tropical, es la baja disponibilidad del P nativo para el establecimiento de pastos mejorados, de manera que cantidades considerables de P deben ser añadidas para satisfacer los requerimientos de las plantas (Fenster y León, 1979). Consecuentemente, esta situación causa se-

serias limitaciones agroeconómicas debido a los altos costos de fertilizantes fosforados.

Una alternativa para la producción de forrajes en los suelos ácidos e infértiles de América tropical es adaptar la planta a estas limitaciones. En efecto, a medida que progresa la investigación sobre gramíneas y leguminosas forrajeras tropicales, es posible evaluar el grado de tolerancia de diferentes especies o ecotipos, con respecto a la toxicidad de Al y la baja disponibilidad de P en el suelo (CIAT, 1977; Spain, 1979).

Con referencia al factor planta, la evolución de las plantas forrajeras en el trópico ha sido en la mayoría de los casos el resultado de una adaptación natural al ecosistema y a la migración de especies a nuevos ambientes, en los cuales han sido sometidas a otro tipo de presiones, dando lugar a nuevas combinaciones de caracteres (Mott y Hutton, 1979). Las presiones de selección han sido aquellas impuestas principalmente por el clima, disponibilidad de nutrimentos en el suelo y competencia de otras especies vegetales y consecuentemente, creando una variabilidad considerable en el recursos genético forrajero del trópico. Schultze-Kraft y Giacometti (1979) señalan que, debido a la amplia variabilidad del material genético existente en el trópico, no se justifica en la actualidad un esfuerzo en la hibridación del material vegetal y por el contrario, debería aumentarse la variabilidad genética en aquellos géneros promisorios mediante la recolección de germoplasma nativo en regiones con suelos ácidos e infértiles, que *per se* estaría adaptado a esas condiciones adversas. Sin embargo, bajo condiciones externas adversas, el criterio de adaptación tiene la implicación importante en cuanto se refiere a la supervivencia del material vegetal por una parte, y al potencial de producción como forraje por otra. Además, la capacidad de subsistencia de la planta forrajera al pastoreo y al corte, así como también la calidad del forraje son aspectos muy importantes, ya que al final el producto a desarrollar es una planta para pastoreo. Una vez realizada la recolección del germoplasma forrajero, la caracterización y evalua

ción cuantitativa del potencial de producción bajo un rango de condiciones de elevada acidez (toxicidad de Al) y/o disponibilidad de nutrientes en el suelo, constituyen una etapa importante en el proceso de selección de especies forrajeras promisorias. De esta manera, un mejor conocimiento sobre la respuesta diferencial de especies forrajeras a las limitaciones de suelo mencionadas, puede proporcionar un significativo aporte en la utilización de extensas áreas de América tropical, lo cual puede determinar una menor inversión en fertilizantes y cal. Esto no implicaría necesariamente la eliminación total de fertilizantes y cal, pero sí puede disminuir las tasas de aplicación necesarias para obtener un establecimiento adecuado de la pastura.

Los objetivos específicos de este trabajo fueron determinar la respuesta diferencial de gramíneas forrajeras tropicales a estrés de Al y P en el Oxisol de Carimagua, Colombia y evaluar un criterio para identificar la tolerancia a estrés de Al y/o P como una parte integral de un sistema de selección de especies forrajeras a condiciones adversas del suelo.

MATERIALES Y METODOS

El sitio experimental estuvo localizado en el Centro Nacional de Investigaciones Agropecuarias ICA-CIAT en Carimagua, Colombia. Este Centro se halla situado a 4°37' latitud Norte y 71,5° longitud Oeste, a una elevación de 175 m sobre el nivel del mar. El clima predominante caracteriza a una sabana hipertérmica estacional con una temperatura media de 26°C y una precipitación anual promedio de 2000 mm, correspondiendo el régimen lluvioso entre Abril y Noviembre, con una época seca de aproximadamente 4-5 meses (ICA-CIAT, 1979; Spain, 1979).

El suelo fue clasificado como un Haplustox Típico, arcilloso, caolínítico, isohiptérmico (CIAT, 1978). Muestras de este suelo fueron tomadas del área experimental previamente a su utilización

con los propósitos de una caracterización inicial, estudios de incubación de suelo-cal, y determinación de isotermas de fijación de P. Los análisis iniciales de suelo (Cuadro 1), indicaron una alta acidez, baja capacidad de cationes cambiabiles, alto porcentaje de saturación de Al y deficiencia en P disponible. Se consideró las condiciones edáficas de acidez e infertilidad adecuadas para evaluar la respuesta de especies forrajeras a la toxicidad de Al y baja disponibilidad de P.

El estudio de incubación del suelo con diferentes dosis de cal fue conducido siguiendo el procedimiento general desarrollado por Kamprath (1970). El propósito fue medir la neutralización de Al cambiabile para obtener una saturación de Al equivalente a 90, 85, 75 y menos de 20%, respectivamente. Las dosis de cal dolomítica empleadas fueron de 0, 0,5, 1,0 y 5,0 ton/ha, respectivamente; y que fueron seleccionadas por extrapolación directa de los estudios de incubación del suelo. La isoterma de fijación de P se determinó según el método de Fox y Kamprath (1970). De esta isoterma de fijación de P fueron seleccionadas las dosis de 0, 17, 117 y 277 kg de P/ha aplicadas como superfosfato triple, para obtener una concentración de <0,01, 0,02, 0,04 y 0,08 ppm de P en la solución del suelo, respectivamente.

El diseño experimental consistió en parcelas divididas en bloques al azar con tres repeticiones, teniendo como parcela principal a la interacción de cuatro niveles de cal (0, 0,5, 1,0 y 5,0 ton de cal/ha) y cuatro niveles de P (0, 17, 117 y 277 kg de P/ha), las subparcelas consistieron de 40 especies entre gramíneas y leguminosas forrajeras del trópico. El presente trabajo muestra sólo los resultados de las gramíneas que incluyeron a: *Panicum maximum* (Guinea común), *Digitaria decumbens* (Pangola), *Melinis minutiflora* (Gordura), *Hyparrhenia rufa* (Puntero), *Andropogon gayanus* (CIAT-621), *Brachiaria humidicola* (CIAT-682), *Brachiaria decumbens* (CIAT-606), y *Pennisetum purpureum* (pasto Elefante). El tamaño de la parcela principal fue de 20 x 30 m y el de la subparcela de 2,5 x 5 m.

El área experimental cubierta con vegetación natural de sabana fue inicialmente arada a 20 cm de profundidad y la cal, de acuerdo

con los tratamientos, fue aplicada al voleo e incorporada a la profundidad de 20 cm, un mes antes de la siembra. El fertilizante fosforado fue aplicado al voleo días antes de la siembra y con el propósito de evitar desorden nutricional no atribuible a cal y P, se aplicó al voleo una fertilización básica general de N, K, S, Zn, Cu, B y Mo. Luego de la aplicación de los fertilizantes, las subparcelas fueron surcadas a 0,50 m de distancia, correspondiendo cuatro surcos por subparcela. Las especies forrajeras fueron sembradas por semilla y vegetativamente en Agosto-Septiembre de 1977, con un período de establecimiento al primer corte de aproximadamente tres meses. Se realizaron un total de cuatro cortes hasta Febrero 1979 y los resultados presentados de producción de materia seca se refieren al promedio de cuatro cortes y que corresponde a un año del establecimiento de las gramíneas.

Los dos surcos centrales de las subparcelas menos dos metros de ambos extremos fueron cosechados a una altura de corte de acuerdo al tipo de crecimiento de las especies forrajeras, gramíneas erectas a 15 cm y gramíneas rastreras a 5 cm. La producción de materia seca fue basada en el peso seco obtenido del secado de submuestras a 65°C.

Muestras de suelo fueron tomadas en el área experimental después del cuarto corte en cada subparcela. Tres submuestras por subparcela fueron tomadas a la profundidad de 0-20 cm y mezcladas para una muestra compuesta. Las muestras fueron secadas al aire y preparadas para su análisis. Se determinó el pH en una suspensión suelo-agua de 1:1. La acidez intercambiable, Ca y Mg fueron extraídos con KCl 1N y la acidez intercambiable fue determinada por titulación, la cual fue considerada como Al intercambiable (Lin y Coleman, 1960). Calcio y Mg fueron determinados por absorción atómica (Salinas, 1979b). Fósforo disponible fue extraído con la solución Bray-II y potasio fue determinado en este extracto por absorción atómica (Salinas, 1979b).

RESULTADOS Y DISCUSION

Propiedades químicas del suelo

El Cuadro 1 resume las características edáficas del perfil del suelo de Carimagua. En términos de pH se observa que en los primeros 80 cm de profundidad, los valores de pH fluctúan entre 4,1 y 5,0, que es una condición ideal para una elevada solubilidad del Al (McLean, 1976) y por ende, llegar a niveles tóxicos para el crecimiento y desarrollo de muchas especies (Salinas, 1978). En efecto, el Al intercambiable se encuentra entre 1,0 y 3,6 meq/100g y que con el bajo contenido de bases intercambiables (Ca, Mg y K), la capacidad de intercambio catiónico efectiva es baja, fluctuando entre 1,4 y 4,2 meq/100g en los primeros 80 cm de profundidad. Estas características de acidez, se reflejan en la elevada saturación de Al que está por encima del 80%. Varios investigadores han mostrado una correlación significativa entre la saturación de Al y la respuesta de las plantas (Evans y Kamprath, 1970; Sartain y Kamprath, 1975; Salinas, 1978). En general, estos investigadores señalan que por encima del 60% saturación de Al, la mayoría de las especies presentan susceptibilidad a la toxicidad del elemento. Esto significa que, el Oxisol de Carimagua virtualmente tipifica a un suelo mineral ácido con nivel tóxico de Al en los primeros 80 cm de profundidad. Entre 80 y 160 cm existe una baja de la saturación de Al debido principalmente al aumento de Ca y Mg, cationes que llegan a neutralizar el aluminio intercambiable (Fig. 1). Esta situación sugiere un movimiento de Ca y Mg hacia los horizontes inferiores.

En relación a la disponibilidad de P se observa que la capa arable (0-20 cm) presenta un valor de 1,5 ppm de P Bray-II considerado como muy bajo. Prácticamente, por debajo de los 20 cm la cantidad de P presente puede ser considerada como trazas.

El Cuadro 2 resume los cambios de P disponible, pH, Al, Ca, Mg y K intercambiables, así como también los porcentajes de saturación de Al, Ca y Mg, en función de los tratamientos aplicados luego del cuarto

corte de las gramíneas forrajeras. Esta caracterización del suelo corresponde aproximadamente a 18 meses después de las aplicaciones de los tratamientos. Los niveles de cal dolomítica aplicados a los primeros 20 cm de profundidad, resultaron en diferencias significativas en pH, porcentajes de saturación de Al, Ca y Mg. La neutralización del Al estuvo en los rangos requeridos para observar la respuesta diferencial de las especies forrajeras. Sin embargo, es importante resaltar que la adición de fósforo por medio del superfosfato triple causó un aumento considerable en el calcio, debido al contenido de este elemento en el superfosfato triple. Este fertilizante con 45% de P_2O_5 contiene en promedio 31% de $CaCO_3$ equivalente (Mehring, 1961), lo que significa un aporte de 0,63 kg de Ca/kg de P. Teniendo en cuenta esta cantidad, los niveles de P aplicados en el experimento (0, 17, 117 y 277 kg de P/ha) aportaron 0, 11, 74 y 175 kg de Ca/ha, respectivamente. Estas cantidades equivalen a 0, 28, 185 y 428 kg de $CaCO_3$ eq/ha, lo cual influyó en la neutralización del Al cambiante y consecuentemente, en los porcentajes de saturación de Al y Ca a medida que aumentó el nivel de P (Cuadro 3). El porcentaje de saturación de Mg no fue afectado por el superfosfato triple al tener éste bajos contenidos del elemento y el cambio en Mg a cada nivel de cal no es sino un reflejo de la cal dolomítica empleada.

La Figura 2 muestra la relación entre el porcentaje de saturación de Al y los valores de pH del suelo obtenidos luego de 18 meses de aplicados los tratamientos de cal y P. La pendiente de la línea indica que los incrementos del porcentaje de saturación de Al afectan los cambios de pH en una forma bastante similar (disminución en 0,01 unidades de pH por cada unidad de aumento en saturación de Al). Además, la Figura 2 también ilustra el hecho de que alrededor de pH 5,5, la saturación del Al es prácticamente nula. Pearson (1975) concluye que, en general, los suelos ácidos minerales presentan una alta resistencia a los cambios de pH por encima de 5,5 y cualquier intento para encalar estos suelos a los valores convencionales de pH 6,5 a 7,0 no es aconsejable. Además, Kamprath (1972) indica que el encala-

miento de estos suelos para elevar el pH por encima de 6,0, neutralizaría mayormente el hidrógeno, grupos carboxílicos, hidróxidos de Al y Fe, los cuales esencialmente no corresponden a la acidez cambiante de estos suelos. Consecuentemente, los requerimientos de cal que consideren efectos directos y residuales deben ser basados en la neutralización del Al cambiante y no en el cambio del pH *per se*. Por supuesto, existen excepciones para condiciones específicas en la relación suelo-planta, debido a diferencias importantes en los requerimientos de cal entre especies y variedades (Salinas, 1978; Spain, 1976). El grado de tolerancia de especies y variedades puede ser expresado en términos del porcentaje de saturación de Al de la capacidad efectiva de cationes cambiables. Consecuentemente, viene a ser necesaria sólo la aplicación de cal en una cantidad suficiente como para reducir el porcentaje de saturación de Al a niveles que no afecten la producción. Con este criterio, fue desarrollada una ecuación para estimar los requerimientos de cal para compensar la tolerancia a Al de especies y variedades (Cochrane y colaboradores, 1980).

Los niveles de P aplicados al voleo mostraron diferencias significativas entre ellos, pero no al aumentar los niveles de cal, aunque se observa un ligero aumento en los niveles de 17 y 117 kg de P/ha al aumentar la aplicación de cal. Estos resultados concuerdan en cierta manera con los obtenidos por Woodruff y Kamprath (1965) y los publicados por Lathwell (1979), en el sentido de que el encalado aumenta la eficiencia del fertilizante fosforado a causa de una mayor disponibilidad de P. Sin embargo, el encalado sin la aplicación de P no aumentó la disponibilidad del P nativo tal como indica Lathwell (1979). Probablemente, esto se deba a una baja mineralización del P orgánico en este suelo, aun con las aplicaciones altas de cal.

Producción de materia seca

Dos medios externos, suelos ácidos y soluciones nutritivas, han sido empleados para determinar la respuesta diferencial de especies y

variedades a la toxicidad de Al y/o baja disponibilidad de P (Moore *et al.*, 1976; Rhue y Grogan, 1976; Salinas, 1978). Por otra parte, varios parámetros han sido utilizados para interpretar la respuesta diferencial de especies y variedades sometidas a condiciones de estrés de Al y/o P. Entre ellos se citan, la producción de grano y/o materia seca, longitud y/o peso radicular, tasas de crecimiento relativo de parte aérea y raíces, tasas de absorción y translocación de Al, P y otros nutrimentos. Todos estos parámetros utilizados en términos absolutos, relativos o sometidos a análisis de regresiones y correlaciones, así como también comparados con especies o variedades controles, han servido para identificar germoplasma tolerante a diversas condiciones adversas para el desarrollo vegetal (Tanaka y Hayakawa, 1974, 1975; Foy, 1974; Andrew *et al.*, 1973; Salinas, 1978). Sin embargo, de lo mencionado anteriormente, la definición del término "tolerante" presenta algunas limitaciones, debido principalmente a que en la actualidad no se sabe con exactitud lo que constituye la tolerancia a toxicidad de Al y/o baja disponibilidad de P en el medio externo.

Es reconocido el hecho de que algunas especies o variedades son más tolerantes que otras, pero no se conoce qué característica vegetal diferencia entre plantas tolerantes y susceptibles bajo las condiciones que se denominan "adversas". Por esta razón, en la actualidad se considera al grado de productividad de una especie o variedad como un indicador de esa "tolerancia" (Nieman y Shannon, 1976). En base a este criterio, durante la evaluación e interpretación de los resultados de este trabajo, se dió importancia particular al hecho de que especies forrajeras bajo estrés mineral pueden únicamente sobrevivir o producir. Consecuentemente, se visualiza que por lo menos existen cuatro maneras para explicar la tolerancia de estas especies forrajeras a estrés de Al y/o P: 1) La habilidad de una planta para sobrevivir en suelos ácidos infértiles; 2) La producción absoluta de la planta obtenida en el suelo ácido infértil; 3) La producción relativa de la planta obtenida a diferentes grados de acidez y fertilidad del suelo, comparado con la producción obtenida bajo condiciones de

acidez nula (ausencia de Al) y alta fertilidad (alta dosis de P); y 4) La producción relativa de la planta, obtenida a diferentes grados de acidez y fertilidad del suelo en relación a la producción máxima obtenida. Este último criterio difiere del tercero en el sentido de que no todas las especies o variedades desarrollan su máxima productividad bajo condiciones de acidez nula y alta fertilidad.

Por otra parte, se consideró que solamente la habilidad de una gramínea forrajera para sobrevivir en suelos ácidos infértiles no tendría valor si la producción es baja, por tanto, la producción absoluta indicaría el potencial de una especie forrajera para producir en condiciones adversas del suelo. De aquí, rendimientos relativos y absolutos fueron considerados como criterios útiles para interpretar la respuesta diferencial de las gramíneas a estrés de Al y/o P en el Oxisol de Carimagua.

Considerando el rendimiento relativo, se estimó que una producción de materia seca que no excedió al 50% de su rendimiento máximo, es determinante de la condición de "supervivencia" o "producción relativa baja". Cuando el rendimiento relativo estuvo entre 50 y 80% de ese máximo, se consideró a la gramínea en condición de "producción relativa media" y finalmente, por encima del 80% del rendimiento máximo, en condición de "producción relativa alta" bajo estrés de Al y/o P. El límite inferior se fijó en un 50%, con el criterio de que la reducción del potencial de producción de una especie a un 50% o menos tiene una implicación de supervivencia y no de productividad. Criterio bastante empleado en toxicología biológica (Matsumura, 1976; Liener, 1969; Lal, 1979). Finalmente, el límite superior se fijó en 80%, debido a que en la mayoría de los casos por encima de este porcentaje, la tasa de incremento en producción de materia seca por unidad de insumo aplicado (cal y/o fósforo) fue relativamente baja.

El Cuadro 3 presenta la producción de materia seca de las ocho gramíneas forrajeras estudiadas en relación a los diferentes niveles de cal y P aplicados. Estos resultados expresados en términos absolutos, mostraron que las producciones máximas de estas gramíneas fueron

obtenidas a diferentes combinaciones de cal y P, lo cual confirma el criterio 4 indicado anteriormente, en el sentido de que no todas las especies desarrollan su máxima productividad bajo condiciones de no toxicidad de Al y ausencia de estrés nutricional. En la mayoría de los casos, las gramíneas respondieron positivamente al primer incremento de cal y/o P (0,5 ton cal/ha y/o 17 kg P/ha), pero mostraron diferencias marcadas entre ellas bajo condiciones de máximo estrés de Al y P (tratamiento control). Teniendo en cuenta la producción absoluta (ton materia seca/ha) se observa que *Andropogon gayanus* tuvo el mayor potencial de producción bajo cualquier efecto de las interacciones cal-P que el resto de las gramíneas, seguido por *Brachiaria humidicola*. En efecto, *Andropogon gayanus* tiene poco vigor durante la etapa de plántula, pero luego de su establecimiento, las tasas de crecimiento y producción de materia seca supera a varias gramíneas forrajeras (CIAT, 1979). Es importante notar que bajo condiciones de un encalado elevado (5 ton/ha) y dosis altas de P (117 y 277 kg P/ha), todas las gramíneas, con excepción de *Pennisetum purpureum*, manifestaron una reducción en la producción de materia seca, lo cual probablemente esté relacionado con un desbalance nutricional debido a las altas dosis de cal y P aplicadas. *Pennisetum purpureum* fue la única gramínea que mostró una respuesta positiva a cada incremento de cal y P, con un rendimiento máximo en los niveles más altos de cal y P aplicados al suelo (5 ton cal y 277 kg P/ha).

La respuesta diferencial de las ocho gramíneas forrajeras tropicales en términos de rendimiento relativo es ilustrada en las Figuras 3, 4, 5 y 6, respectivamente. Sin la aplicación de cal y P (93% saturación de Al y 1,7 ppm de P), las gramíneas mostraron diferencias marcadas bajo estrés de Al y P. *Brachiaria humidicola* y *Andropogon gayanus* produjeron más del 50% de su rendimiento máximo, mientras que el resto de las gramíneas mostraron un 40% o menos de su producción máxima. El primer histograma de la Figura 3 muestra *per se* la amplia respuesta diferencial a ambas condiciones adversas del suelo, toxicidad de Al y baja disponibilidad de P. Las gramíneas que no alcanzaron un 50% de su rendimiento máximo son consideradas en un estado de

"supervivencia" o "producción relativa baja", bajo los efectos del Al tóxico y baja disponibilidad de P. Sin embargo, la producción de materia seca (producción absoluta) es considerada importante, por el hecho de que esta producción aunque no sobrepase el límite de 50% del rendimiento máximo, la cantidad de forraje producido puede satisfacer el criterio de tener una pastura aceptable y persistente. Esto sucede con *Brachiaria decumbens* al compararla con *Brachiaria humidicola*. El potencial de máxima producción de materia seca de *Brachiaria decumbens* fue de 7,1 ton/ha, mientras que el de *Brachiaria humidicola* fue de 3,3 ton/ha. Este potencial de producción determina una diferencia considerable entre ambas gramíneas al expresarla en términos relativos, pero que en términos absolutos y bajo condiciones de estrés de Al y P no existen diferencias considerables. Por esta razón, además de la producción relativa, debería considerarse la producción absoluta, por lo menos en el caso de especies forrajeras.

Con el primer incremento de P (17 kg P/ha) y manteniendo el estrés de Al (90% saturación de Al), la mayoría de las gramíneas aumentaron su rendimiento relativo. *Hyparrhenia rufa* y *Melinis minutiflora* sobrepasaron el límite de "supervivencia" o "producción relativa baja" pasando a una "producción relativa media". *Brachiaria humidicola* con este incremento bajo de P pasó el límite de "producción relativa media" (>80% producción relativa); *Andropogon gayanus* mantuvo su producción relativa, lo que significa que esta gramínea requiere de una mayor neutralización del Al o un suministro nutricional de Ca y Mg para una alta producción. Esta situación se explica al observar las Figuras 4 y 5, donde *Andropogon gayanus* pasó a una "producción relativa media" con 0,5 ton cal/ha y "producción relativa alta" con 1 ton cal/ha. En ambos casos, sin la aplicación de P o con el primer incremento de P (17 kg P/ha).

Se observa que con la adición de 0,5 ton de cal, cantidad que en promedio sólo neutralizó el Al en un 6%. la mayoría de las especies mostraron un incremento en producción de materia seca (Fig. 4). Resultados similares fueron observados cuando se aplicó 1 ton cal/ha (Fig.5).

Estos resultados indican que la respuesta de las gramíneas tolerantes a Al fue principalmente relativa a requerimientos nutricionales de Ca y Mg más que a un efecto de encalado. En general, con las aplicaciones de dosis altas de P (117 kg P y 277 kg/ha), las gramíneas mostraron un aumento en la producción de materia seca (absoluta y relativa); pero sin la aplicación de cal, *Brachiaria decumbens*, *Digitaria decumbens* y *Panicum maximum* no sobrepasaron el límite del 50% de rendimiento relativo. Estas gramíneas entraron a una "producción relativa media" al aplicarse 0,5 ton cal/ha (Fig. 4).

Cuando el aluminio se neutralizó (22% Sat.Al) con la aplicación de 5 ton cal dolomítica/ha (Fig. 6), las ocho gramíneas forrajeras mostraron más del 50% de producción relativa en los dos niveles bajos de P (1,5 y 2,9 ppm P). Sin embargo y como se dijo anteriormente, el incremento de la dosis de P causó en la mayoría de las gramíneas una reducción de la producción. Este comportamiento fue atribuido a un desbalance nutricional debido a las dosis altas de cal y P aplicadas. Varios investigadores indican que un encalado excesivo y/o una elevada dosis de P pueden tener efectos nocivos sobre el desarrollo de las plantas, principalmente debido a una deficiencia de Zn (Kamprath, 1972; Spain, 1976; Salinas, 1978; Cochrane *et al.*, 1980).

De los resultados de este experimento se puede concluir que los criterios de "producción relativa baja" o "supervivencia", "producción relativa media" y "producción relativa alta" obtenidos en base a la producción máxima absoluta, explican la respuesta diferencial de ecotipos forrajeros bajo condiciones de estrés de Al y/o P en suelos ácidos e infértiles. Este criterio relacionado al de rendimientos absolutos, permite comparar la tolerancia diferencial entre ecotipos forrajeros a estrés de Al y/o P aunque cada uno de ellos tenga diferente potencial genético para la producción de materia seca. Entre las gramíneas forrajeras tolerantes a la toxicidad de Al y baja disponibilidad de P se destacan, *Brachiaria humidicola* y *Andropogon gayanus*. En general, la mayoría de las gramíneas respondieron positivamente a las aplicaciones de Ca, Mg y P, incrementando su producción relativa hasta alcanzar más del 50% o aún más del 80% de su producción máxima, con aplicaciones bajas de cal y P.

LITERATURA CITADA

- Andrew, C.S., A.D. Johnson and R.L. Sandland. 1973. Effect of aluminum on the growth and chemical composition of some tropical and temperate pasture legumes. *Australian Journal Agriculture*. Res.24:325-339.
- Andrew, C.S. and P.J. Vanden-Berg. 1973. The influence of aluminum on phosphate absorption by whole plants and excised roots of some pasture legumes. *Australian Journal Agriculture*. Res. 24:341-351.
- Centro Internacional de Agricultura Tropical. 1978. Informe Anual 1977. Programa de Ganado de Carne. CIAT, Cali, Colombia.
- Centro Internacional de Agricultura Tropical. 1979. Informe Anual 1978. Programa de Ganado de Carne. CIAT, Cali, Colombia.
- Cochrane, T.T., J.G. Salinas and P.A.Sánchez. 1980. An equation for liming acid mineral soils to compensate Al tolerance. *Tropical Agriculture*. 59:133-140.
- Evans, C.E. and E.J. Kamprath. 1970. Lime response as related to percent Al saturation, solution Al, and organic matter content. *Soil Science Society of America Proceedings*. 34:893-896.
- Fenster, W.E. y L.A.León. 1979. Manejo de la fertilización con fósforo para el establecimiento y mantenimiento de pastos mejorados en suelos ácidos e infértiles de América Tropical. p.119-133. In L.E.Tergas y P.A.Sánchez (eds.), *Producción de Pastos en Suelos Ácidos de los Trópicos*. Centro Internacional de Agricultura Tropical, Cali, Colombia.
- Fox R.L. and E.J. Kamprath. 1979. Phosphate sorption isotherms for evaluating the phosphate requirements of soils. *Soil Science Society of America Proceedings*. 34:902-907.
- Foy, C.D. 1974. Effects of aluminum on plant growth. p.601-642. In E.W. Carson (ed.), *The Plant Root and Its Environment*. University Press of Virginia, Charlottesville.

- Gualdrón, R. y J.M. Spain. 1979. Calcio y magnesio: Ocurrencia y magnitud de los problemas en suelos ácidos. VI Coloquio de Suelos, Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo. Palmira, Colombia. 23 p.
- Heylar, K.R. 1978. Effects of aluminum and manganese toxicities on legume growth. p.207-231. In C.S. Andrew and E.J. Kamprath (eds.), Mineral Nutrition of Legumes in Tropical and Subtropical Soils. Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization, Melbourne, Australia.
- Instituto Colombiano Agropecuario-Centro Internacional de Agricultura Tropical. 1979. Informe Anual Carimagua 1978. CIAT, Cali, Colombia. 138 p.
- Kamprath, E.J. 1970. Exchangeable aluminum as a criterion for liming leached mineral soils. Soil Science Society of America Proceedings. 34:252-254.
- Kamprath, E.J. 1972. Soil acidity and liming. p.136-149. In M. Drosdoff (Chairman), Soils of the Humid Tropics. National Academy Science, Washington, D.C.
- Lal, R. 1979. Erosion as a constraint to food production in the tropics. Soil Constraints Conference, IRRI, Los Baños, Filipinas (En prensa).
- Lathwell, D.J. (ed.). 1979. Crop response to liming of Ultisols and Oxisols. Cornell International Agriculture Bulletin 35, Cornell University, Ithaca, New York. 36 p.
- Liener, I.E. 1969. Introduction. p.1-5. In I.E.Liener (ed.), Toxic Constituents of plant food stuffs. Academic Press, New York.
- Lin, C. and N.T. Coleman. 1960. The measurement of exchangeable aluminum in soils and clays. Soil Science Society of America Proceedings. 24:444-446.
- Matsumura, F. 1976. Toxicology of insecticides. Plenum Press, New York. 503 p.
- Mehring, A.L. 1961. Dictionary of plant food - A guide to fertilizer materials and terms. Farm Chemicals, Meister Publishing, Co., Willoughby, Ohio. 26 p.

- McLean, E.O. 1976. Chemistry of soil aluminum. *Community Soil Science Plant Analysis*. 7:619-636.
- Moore, D.P., W.E. Kronstand and R.J. Metzger. 1976. Screening wheat for aluminum tolerance. p. 287-295. *In* M.J. Wright (ed.), *Plant Adaptation to Mineral Stress in Problem Soils*. Cornell University, Ithaca, New York.
- Mott, G.O. and E.M. Hutton. 1979. Estrategias para la colección y el mejoramiento de plantas forrajeras. p.1-4. *In* G.O.Mott y A. Jiménez (eds.), *Manual para la Colección, Preservación y Caracterización de Recursos Forrajeros Tropicales*. Centro Internacional de Agricultura Tropical, Cali, Colombia.
- Nieman, R.H. and M.C. Shannon. 1976. Screening plants for salinity tolerance. p.359-367. *In* M.J. Wright (ed.), *Plant Adaptation to Mineral Stress in Problem Soils*. Cornell University, Ithaca, New York.
- Rhue, R.D. and C.O. Grogan. 1976. Screening corn for aluminum tolerance p.297-310. *In* M.J. Wright (ed.), *Plant Adaptation to Mineral Stress in Problem Soils*. Cornell University, Ithaca, New York.
- Salinas, J.G. 1978. Differential response of some cereal and bean cultivars to Al and P stress in an Oxisol of central Brazil. Ph.D. Thesis. North Carolina State University, Raleigh. 326 p.
- Salinas, J.G. 1979a. Adaptación de plantas a toxicidades de aluminio y manganeso en suelos ácidos. *Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo*. Bogotá, Colombia. 31 p.
- Salinas, J.G. 1979b. Métodos Analíticos para Suelos Acidos y Plantas. *Centro Internacional de Agricultura Tropical*, Cali, Colombia. 53 p.
- Sánchez, P.A. and T.T.Cochrane. 1979. Soil constraints in relation to major farming systems of tropical America. *Soil constraints Conference, IRRI, Los Baños, Filipinas* (In press).
- Sartain, J.B. and E.J. Kamprath. 1975. Effect of liming a highly Al-saturated soil on the top and root growth and soybean nodulation. *Agronomy Journal*. 67:507-510.

- Schultze-Kraft, R. y D.C. Giacometti. 1979. Recursos genéticos de leguminosas forrajeras para las sabanas de suelos ácidos e infértiles en América tropical. p.59-69. In L.E.Tergas y P.A.Sánchez (eds.), Producción de Pastos en Suelos Acidos de los Trópicos. Centro Internacional de Agricultura Tropical, Cali, Colombia.
- Spain, J.M. 1976. Field studies on tolerance of plant species and cultivars to acid soil conditions in Colombia. p.213-222. In M.J. Wright (ed.), Plant Adaptation to Mineral Stress in Problem Soils. Cornell University, Ithaca, New York.
- Spain, J.M. 1979. Establecimiento y manejo de pastos en los Llanos Orientales de Colombia. p.181-189. In L.E.Tergas y P.A.Sánchez (eds.), Producción de Pastos en Suelos Acidos de los Trópicos. Centro Internacional de Agricultura Tropical, Cali, Colombia.
- Tanaka, A. and Y. Hayakawa. 1974. Comparative studies on plant nutrition. Crop tolerance to soil acidity. I. Tolerance to low pH. II. Tolerance to high levels of Al and Mn. Journal Science Soil Manure. 45:561-570.
- Tanaka, A. and Y. Hayakawa. 1975. Comparative studies on plant nutrition. Crop tolerance to soil acidity. III. Tolerance to soil acidity. Journal Science Soil Manure. 46:19-32.
- Woodruff, J.R. and E.J. Kamprath. 1965. Phosphorus adsorption maximum as measured by the Langmuir isotherm and its relationship to phosphorus availability. Soil Science Society of America Proceedings. 29:148-150.

Cuadro 1. Características edáficas iniciales del perfil del suelo (Haplustox típico, arcilloso, caolinitico, isohipertérmico), Carimagua, Colombia.

Profundidad	Arcilla	Arena	pH _{H₂O} (1:1)	P**	Cationes cambiabiles				CICE	Sat.
					Al*	Ca*	Mg*	K**		Al
cm	----- % -----			ppm	-----meq/100 g-----				%	
0 - 20	38	12	4,1	1,5	3,6	0,36	0,09	0,11	4,16	86,5
20 - 40	40	12	4,0	0,4	2,7	0,19	0,04	0,07	3,00	90,0
40 - 60	43	11	4,2	0,4	1,8	0,24	0,06	0,05	2,15	83,7
60 - 80	43	12	4,5	0,3	1,0	0,26	0,08	0,04	1,38	72,5
80 - 100	45	12	4,9	0,3	0,4	0,21	0,07	0,04	0,72	55,6
100 - 120	45	12	4,9	0,1	0,4	0,25	0,09	0,04	0,78	51,3
120 - 140	45	12	4,9	0,4	0,7	0,47	0,10	0,04	1,40	50,0
140 - 160	45	12	4,9	0,3	0,8	0,33	0,12	0,04	1,29	62,0
160 - 180	45	12	5,0	0,1	1,2	0,35	0,13	0,05	1,73	69,4
180 - 200	45	12	5,0	0,3	1,3	0,41	0,14	0,05	1,90	68,4

* Extractor KCl 1N

** Extractor Solución Bray-II

CICE: Capacidad de Intercambio Catiónico Efectiva.

Cuadro 2. Características químicas de la capa arable (0-20 cm) en las parcelas con tratamientos de cal y fósforo después del cuarto corte (Febrero, 1979).

Tratamientos		pH _{H₂O} (1:1)	P*	Cationes cambiabiles				Saturación de Al	Saturación de Ca	Saturación de Mg
Cal	Fósforo			Al	Ca	Mg	K			
ton/ha	kg/ha	ppm		-----meq/100g-----				-----%-----		
0	0	4,1	1,7	3,22	0,14	0,04	0,07	93,0	4,0	1,20
	17	4,4	2,1	3,47	0,26	0,05	0,07	90,1	6,8	1,30
	117	4,4	11,7	2,96	0,28	0,04	0,08	88,6	7,8	1,20
	277	4,5	40,5	2,75	0,37	0,05	0,06	75,1	11,5	1,50
0,5	0	4,4	1,4	3,16	0,33	0,08	0,07	86,8	9,1	2,20
	17	4,5	2,3	3,00	0,34	0,08	0,08	85,7	9,7	2,30
	117	4,5	14,8	3,19	0,52	0,13	0,08	80,9	13,6	3,40
	277	4,6	43,6	3,18	0,54	0,08	0,06	82,4	14,0	2,07
1,0	0	4,7	1,4	2,31	0,57	0,21	0,08	72,9	18,0	6,6
	17	4,4	2,4	2,46	0,58	0,16	0,06	75,5	17,8	4,9
	117	4,7	16,7	2,40	0,66	0,18	0,06	72,7	20,0	5,5
	277	4,7	37,5	2,12	0,74	0,16	0,06	68,8	24,0	5,2
5,0	0	5,1	1,5	0,97	1,99	0,75	0,06	25,7	52,8	19,9
	17	5,1	2,9	0,86	2,16	0,78	0,06	22,3	56,0	20,2
	117	5,1	18,3	0,96	2,44	0,91	0,07	21,9	55,7	20,8
	277	5,1	43,0	0,86	2,25	0,73	0,05	22,1	57,8	18,8

* Extractor solución Bray-II.

Cuadro 3. Producción promedio de materia seca de ocho gramíneas forrajeras a diferentes niveles de saturación de Al y P en un Oxisol de Carimagua (Promedio de cuatro cortes y tres repeticiones).

Ca1 aplicada	P aplicado	G r a m í n e a s				f o r r a j e r a s			
		<i>Brachiaria humidicola</i>	<i>Andropogon gayanus</i>	<i>Hyparrhenia rufa</i>	<i>Melinis minutiflora</i>	<i>Brachiaria decumbens</i>	<i>Digitaria decumbens</i>	<i>Panicum maximum</i>	<i>Pennisetum purpureum</i>
ton/ha	kg/ha	-----ton/ha-----							
0	0	2,41	3,87	1,87	1,54	2,17	1,04	1,54	0,99
	17	2,93	3,64	2,99	2,79	2,62	1,49	1,62	1,38
	117	2,74	3,78	3,34	3,69	2,67	2,36	2,38	3,12
	277	3,33	4,84	2,26	3,67	3,40	2,16	2,21	5,29
0,5	0	2,65	4,28	2,71	3,42	2,09	1,84	1,38	3,05
	17	2,98	3,71	2,50	3,88	3,09	2,12	1,92	3,10
	117	2,57	7,26	4,31	3,23	2,92	2,45	2,65	4,74
	277	2,23	3,80	2,17	2,78	3,76	2,70	3,30	5,58
1,0	0	2,85	6,36	2,13	1,92	2,78	1,77	2,80	4,15
	17	2,55	6,04	2,77	2,51	4,74	2,22	2,78	4,75
	117	2,56	6,79	3,28	1,60	4,97	2,30	2,93	5,74
	277	2,80	5,81	4,11	2,95	2,84	4,59	4,90	5,86
5,0	0	2,43	5,67	3,37	2,74	5,32	2,54	3,13	5,22
	17	2,53	7,35	3,63	3,03	7,14	3,58	3,40	5,68
	117	1,68	4,44	3,21	2,64	5,29	1,93	4,27	6,24
	277	2,38	5,99	3,54	1,90	4,38	2,00	3,77	6,98

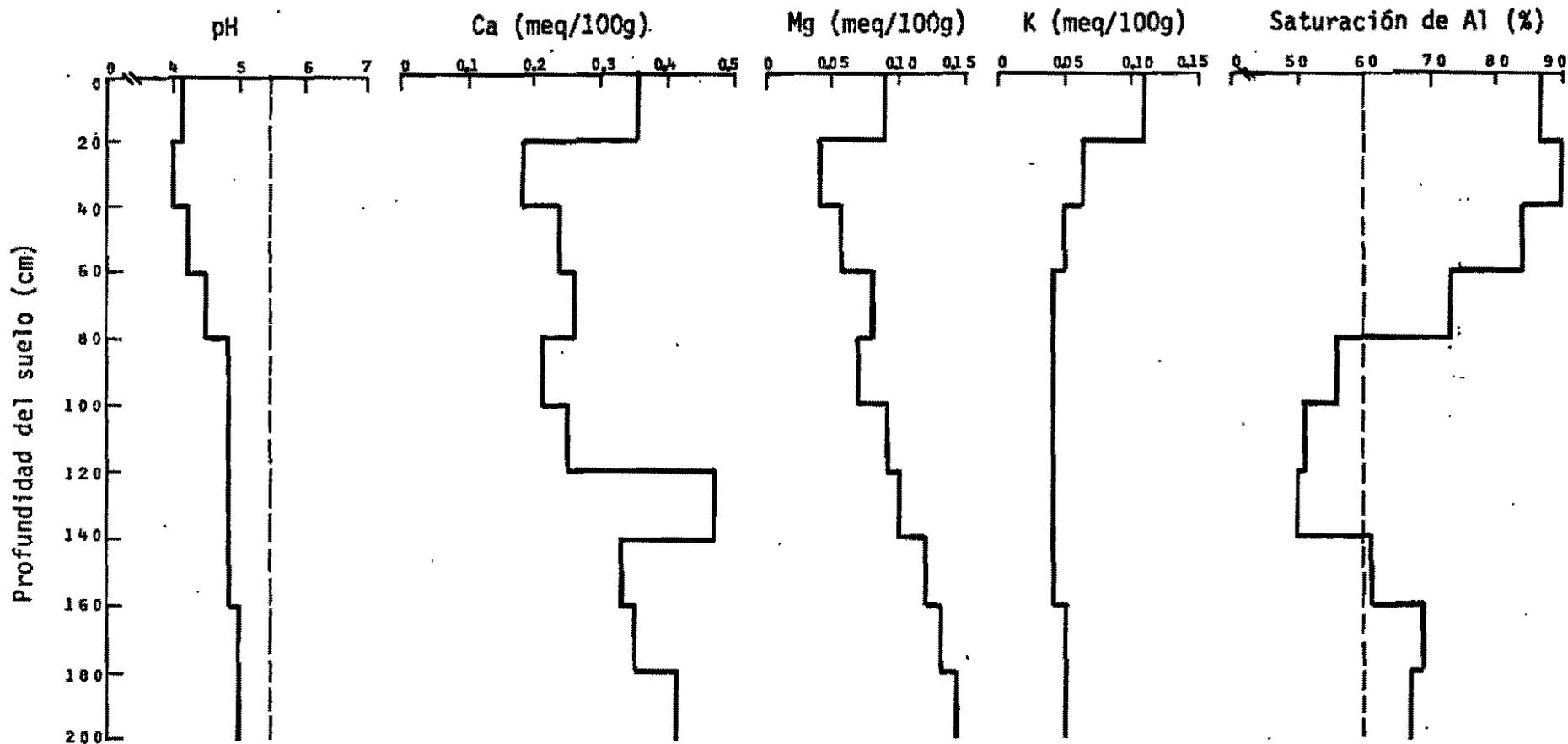


Figura 1. Perfiles de acidez (pH y Sat.Al) y de bases cambiables del Oxisol de Carimagua, Colombia.

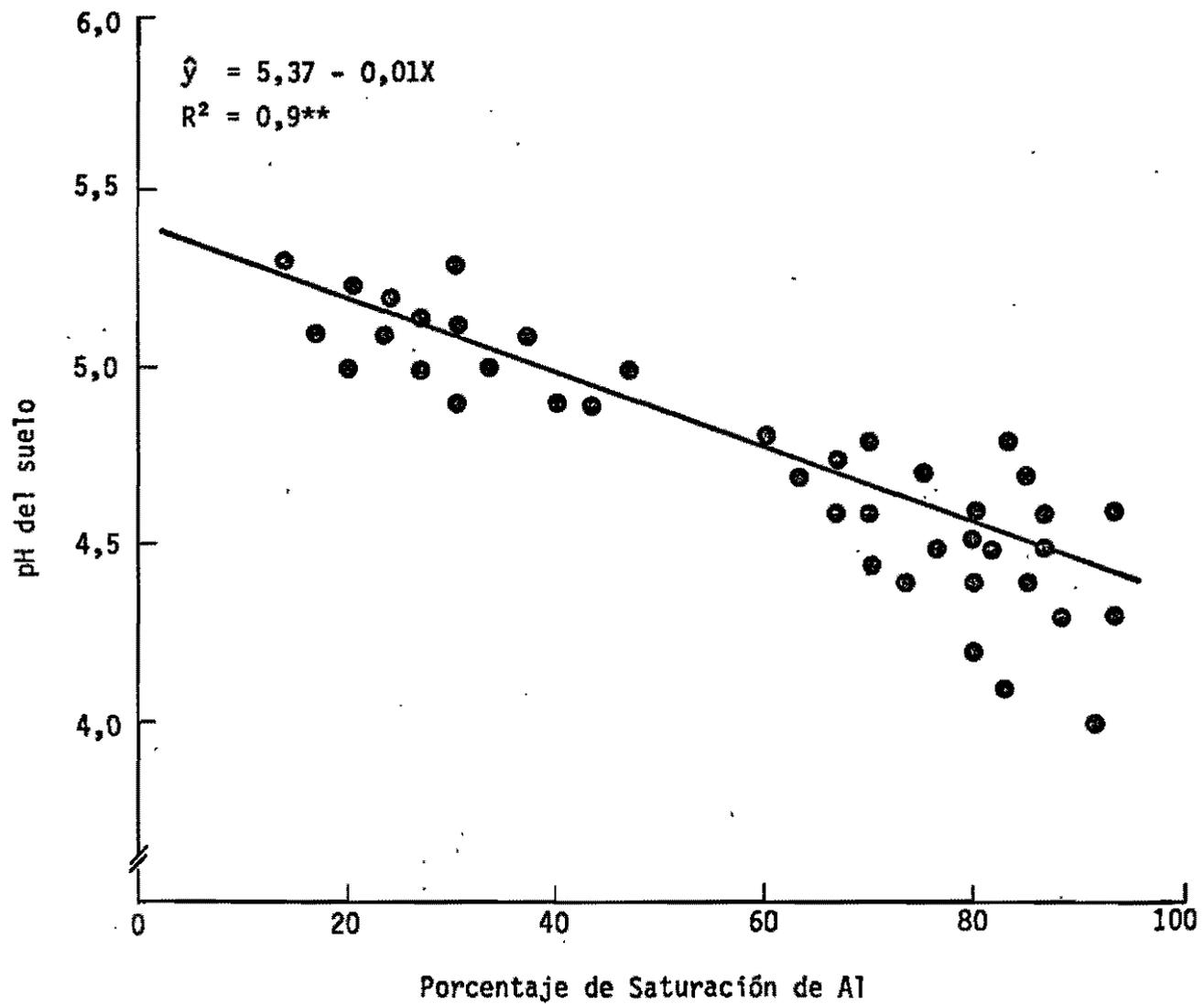
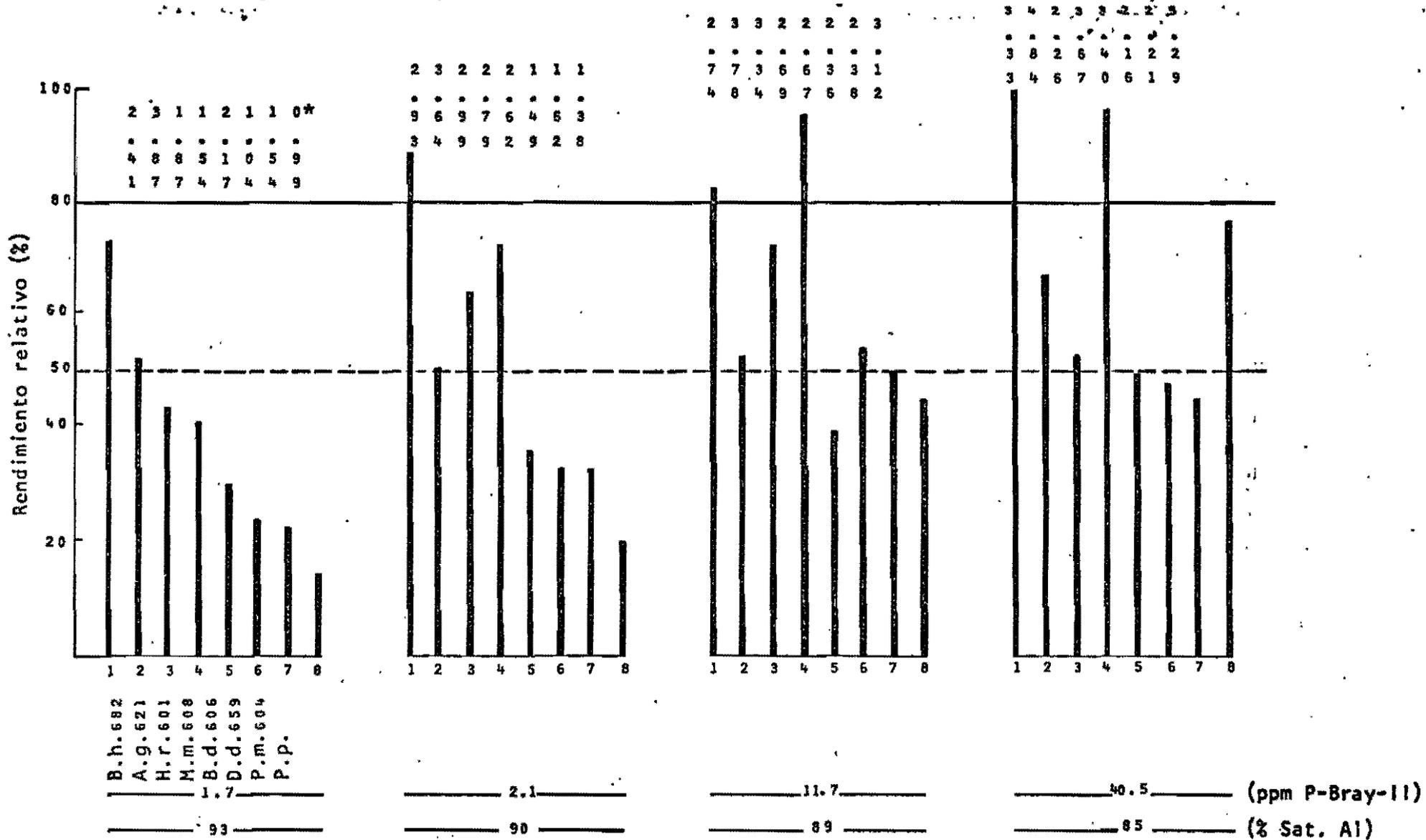


Figura 2. Relación entre la saturación del Al y el pH del suelo a la profundidad de 0-20 cm en el Oxisol de Carimagua.



* Rendimiento MS (ton/ha)

Figura 3. Respuesta diferencial de ocho gramíneas tropicales a diferentes niveles de fósforo y saturación de Al (sin aplicación de cal) bajo condiciones de campo en Carimagua.

(B.h. 682 = *Brachiaria humidicola*; A.g. 621 = *Andropogon gayanus*;
H.r. 601 = *Hyparrhenia rufa*; M.m. 608 = *Melinis minutiflora*;
B.d. 606 = *Brachiaria decumbens*; D.d. 659 = *Digitaria decumbens*;
P.m. 604 = *Panicum maximum*; and P.p. = *Pennisetum purpureum*).

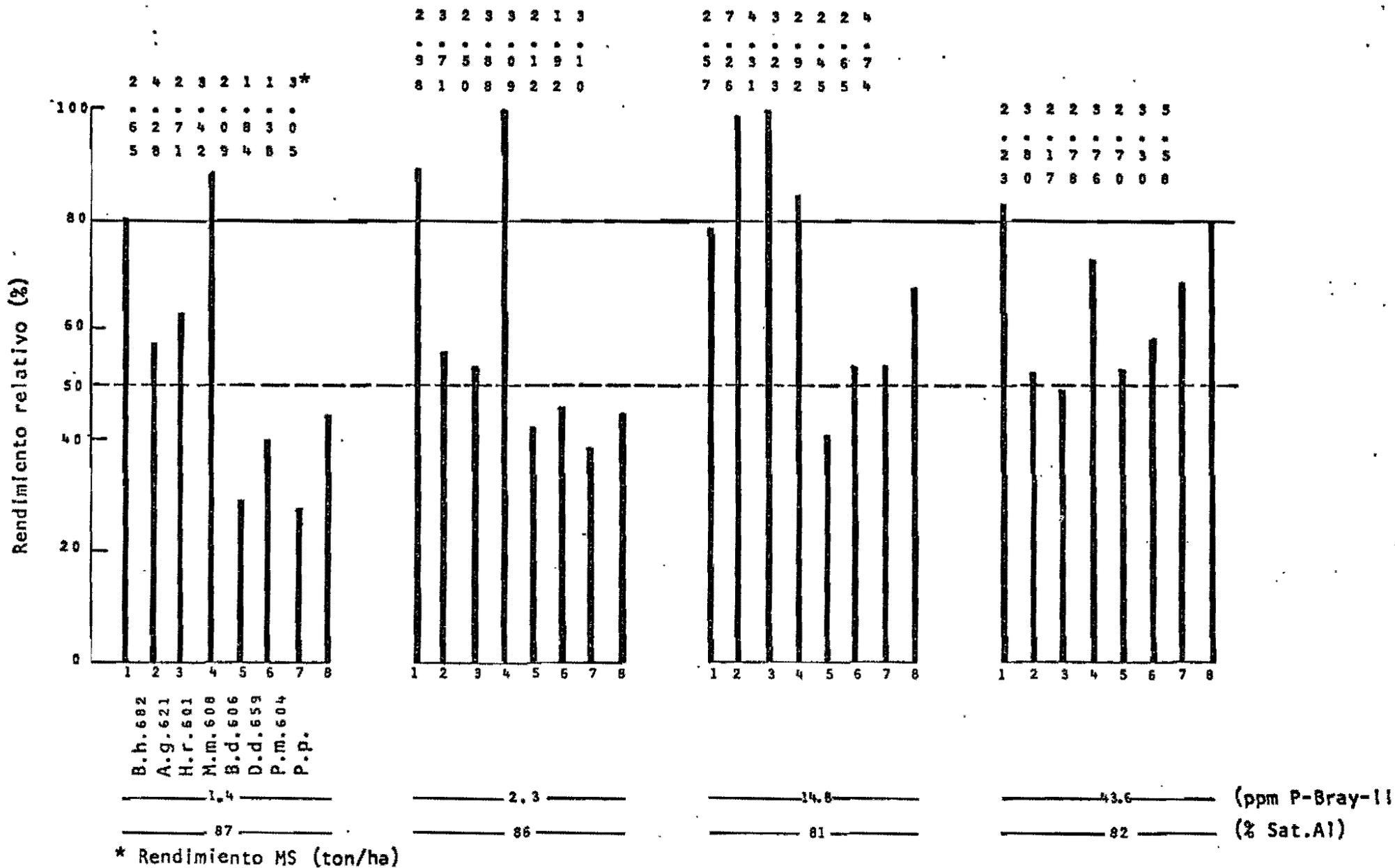


Figura 4. Respuesta diferencial de ocho gramíneas tropicales a diferentes niveles de fósforo y saturación de Al (1/2 ton cal/ha) bajo condiciones de campo en Carimagua (Ref. a Fig. 3 para identificación de accesiones).

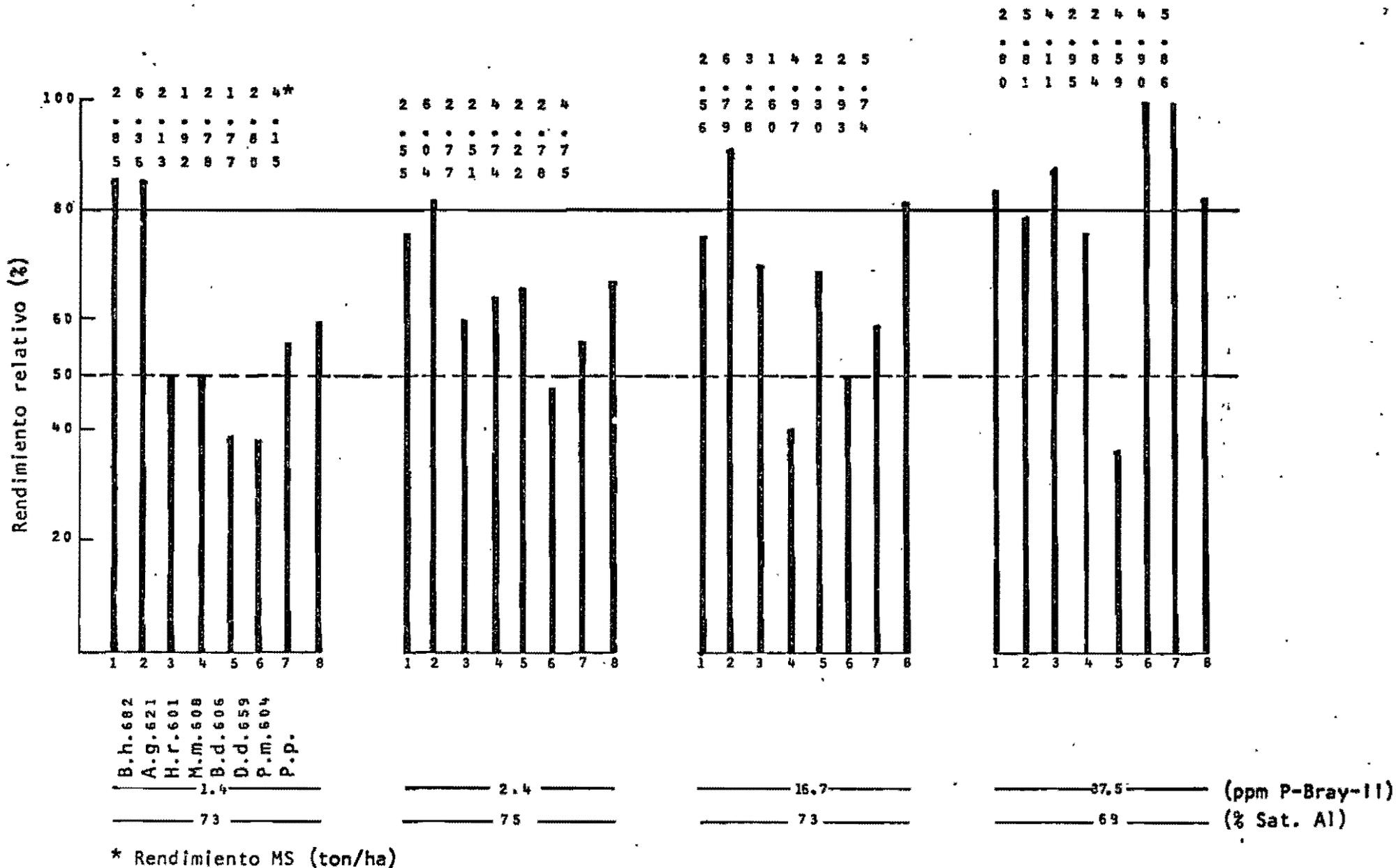
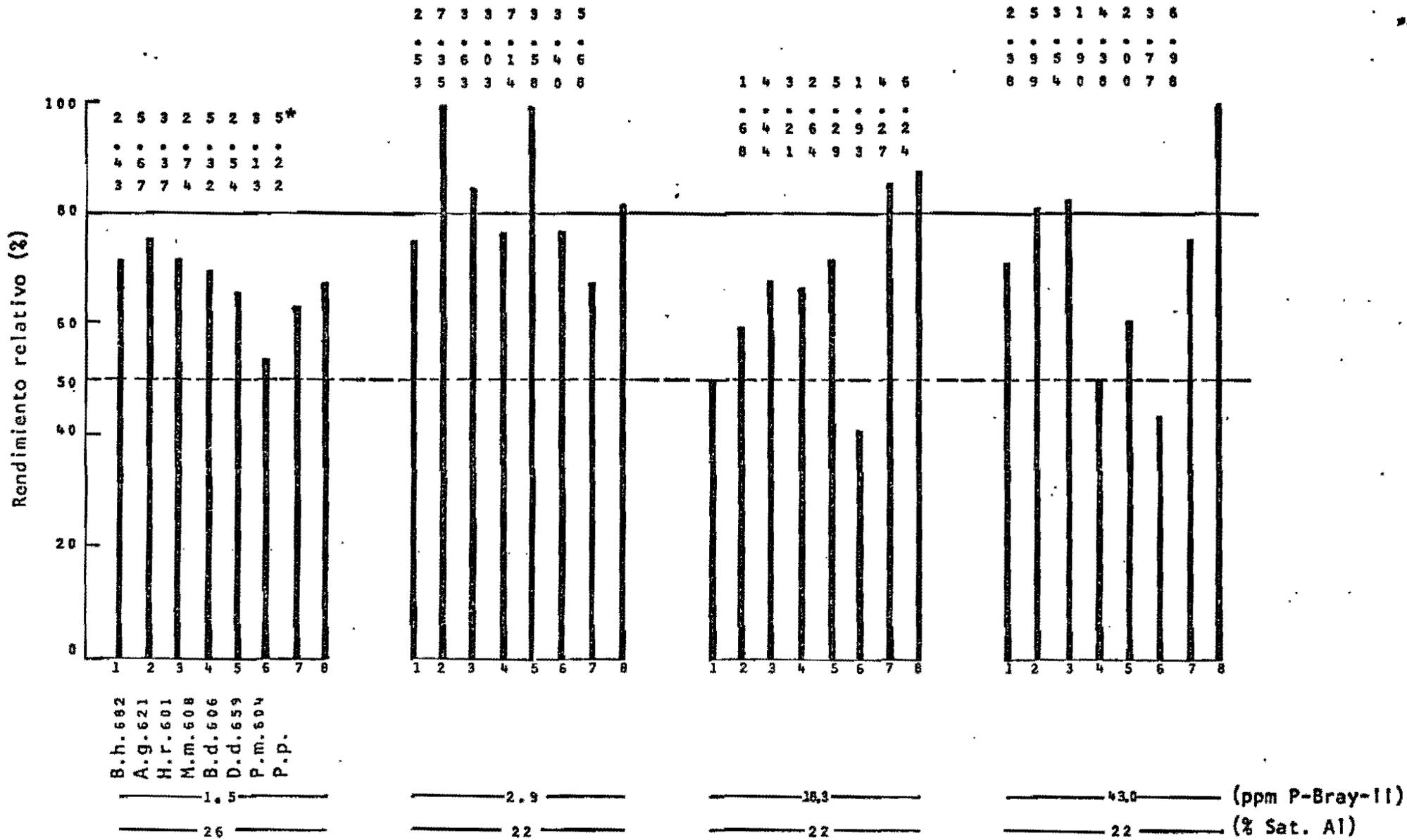


Figura 5. Respuesta diferencial de ocho gramíneas tropicales a diferentes niveles de fósforo y saturación de Al (1 ton cal/ha) bajo condiciones de campo en Carimagua (Ref. a Fig. 3 para identificación de accesiones).



* Rendimiento MS (ton/ha)

Figura 6. Respuesta diferencial de ocho gramíneas tropicales a diferentes niveles de fósforo y saturación de Al (5 ton cal/ha) bajo condiciones de campo en Carimagua (Ref. a Fig. 3 para identificación de accesiones).