

CARACTERIZACION DEL MAGNESIO Y DE OTROS FACTORES QUE  
AFECTAN SU DISPONIBILIDAD PARA LAS PLANTAS EN SUELOS  
ANDINOS DE CUNDINAMARCA

T E S I S

Presentada al Programa de Estudios para Graduados  
Universidad Nacional de Colombia - Instituto Colombiano Agropecuario

Por:

Gabriela Estrada Estrada

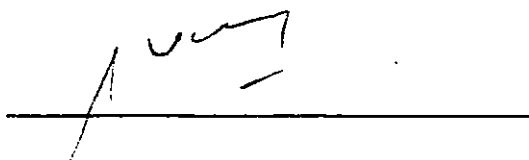
Como requisito parcial para optar al título de Magister Scientiae

BOGOTA - COLOMBIA

1981

TESIS APROBADA POR COMITE CONSEJERO

Ricardo Guerrero R., M.S.  
Presidente de Tesis

A handwritten signature in black ink, appearing to be 'Ricardo Guerrero R.', written over a horizontal line.

Rodrigo Lora S., M.S.  
Consejero

A handwritten signature in black ink, appearing to be 'Rodrigo Lora S.', written over a horizontal line.

Ricardo Martínez B., M.S.  
Consejero

A handwritten signature in black ink, appearing to be 'Ricardo Martínez B.', written over a horizontal line.

ESTE TRABAJO SE REALIZO, EN SU TOTALIDAD, EN LA UNIVERSIDAD  
NACIONAL DE COLOMBIA - BOGOTA.

## AGRADECIMIENTOS

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Agronomía (Laboratorios de Fisiología Vegetal y de Suelos)

Departamento de Química (Secciones de Química Analítica y de Instrumental  
y Servicios, Cátedra de Química Agrícola)

Centro de Cálculo Electrónico

Instituto Colombiano Agropecuario

Laboratorio de Suelos - Tibaitatá

Doctor Ricardo Guerrero R. (U.N.)

Doctor José María Velásquez O. (U.N.)

Doctor Leonidas Mejía (CIAF)

Doctor Rodrigo Lora (ICA)

Doctor Ricardo Martínez (U.N.)

Doctores María Cristina Burbano, Carmenza Gómez, Alvaro Cortés, Guillermo Zambrano, Juan Ospina, Germán Corchuelo (miembros del personal docente de la Universidad Nacional), Emigdio Ballón y Oscar Hurtado.

Señora Luz Helena Estrada

## CONTENIDO

	<u>Pág.</u>
1 - INTRODUCCION	1
2 - REVISION DE LITERATURA	3
2.1    EL MAGNESIO EN EL SUELO	3
2.2    EL MAGNESIO DISPONIBLE PARA LAS PLANTAS Y LA DINAMICA DEL ELEMENTO EN EL SUELO	4
2.3    ALGUNOS FACTORES DEL SUELO QUE AFECTAN LA ABSORCION DEL MAGNESIO POR LAS PLANTAS	7
2.3.1    Relación Calcio-Magnesio	7
2.3.2    Relación Magnesio-Potasio	8
2.3.3    Contenido de materia orgánica	9
2.3.4    Nitrógeno	9
2.4    INDICES DE DISPONIBILIDAD DEL MAGNESIO PARA LA PLANTA	9
2.5    NIVELES CRITICOS PARALA INTERPRETACION DE LA DISPONIBILIDAD DEL MAGNESIO	11
2.5.1    Mg-Intercambiable	13
2.5.2    Porcentaje de saturación de magnesio	14
2.5.3    Relación Mg/K	15
2.5.4    Combinación de determinaciones	15
3 - MATERIALES Y METODOS	17
3.1.    SUELOS	17
3.1.1    Características geneales de la Región de estudio	17

	<u>Pág.</u>	
3.1.2	Características de los suelos estudiados	18
3.1.3	Mineralogía de los suelos estudiados	21
3.2	CARACTERIZACION DE LOS SUELOS	22
3.3	CARACTERIZACION DEL MAGNESIO	23
3.3.1	Fraccionamiento del magnesio	23
3.3.2	Otras fracciones de magnesio	25
3.4	RESTITUCION DEL MAGNESIO INTERCAMBIABLE	26
3.5	MAGNESIO, CALCIO Y POTASIO INTERCAMBIABLES ANTES Y DESPUES DE LA COSECHA	27
3.5.1	Magnesio, Calcio y Potasio intercambiables antes de la cosecha	27
3.5.2	Bases después de la cosecha	27
3.6	ENSAYO EN MATERAS	27
3.6.1	Suelos	27
3.6.2	Fertilización	28
3.6.3	Adición del magnesio	28
3.6.4	Siembra	29
3.6.5	Cosecha	29
3.6.6	Diseño y localización del experimento	29
3.7	ANALISIS DEL MATERIAL VEGETAL	29
3.7.1	Determinación del peso seco	29
3.7.2	Digestión	30

	<u>Pág.</u>	
3.8	VARIABLES DE RESPUESTA	30
3.9	ANALISIS ESTADISTICO	30
3.10	DETERMINACION DEL NIVEL CRITICO	32
4 -	RESULTADOS Y DISCUSION	33
4.1	FRACCIONES DE MAGNESIO	33
4.2	CAPACIDAD DE RESTITUCION DEL MAGNESIO INTERCAMBIABLE	39
✓ 4.3	RESPUESTA DE LAS PLANTAS A LA ADICION DE MAGNESIO	46
4.3.1	Rendimiento en peso seco	46
4.3.2	Absorción total de magnesio	48
4.3.3	Concentración de magnesio en la planta	48
4.4	FRACCIONES DE MAGNESIO EN LA RELACION CON LA PLANTA	51
4.4.1	Rendimiento relativo	51
4.4.2	Absorción total de magnesio	55
4.4.3	Concentración de magnesio en el tejido vegetal del primer corte	56
4.4.4	Mg-intercambiable antes y después de la cosecha y relación del magnesio absorbido por la planta con el Mg-intercambiable inicial	57
4.4.4.1	Cambio del Mg-intercambiable	57
4.4.4.2	Relación entre el Mg-intercambiable inicial y el absorbido por la planta	60

	<u>Pág.</u>
4.5 INDICES DE DISPONIBILIDAD Y NIVELES CRITICOS	60
4.5.1 Indices de disponibilidad	60
4.5.2 Cálculo de niveles críticos	73
5 - CONCLUSIONES	75
6 - RESUMEN	78
7 - SUMMARY	80
8 - REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS	
 APENDICE	

## LISTA DE TABLAS

	<u>Pág.</u>
1. Algunas características de los 20 suelos bajo estudio	20
2. Fracciones de magnesio en los suelos estudiados	34
3. Coeficientes de correlación lineal entre algunas fracciones de magnesio en el suelo	36
4. Restitución del magnesio intercambiable (Valor acumulado a los diferentes períodos de incubación)	40
5. Coeficientes de correlación lineal entre el magnesio restituído en 16 semanas y las fracciones de magnesio en el suelo	44
6. Rendimiento de la cosecha (en base seca). Total de 3 cortes	47
7. Magnesio absorbido por la cosecha total	49
8. Concentración de magnesio en el tejido vegetal, en los suelos fertilizados o no con magnesio	50
9. Coeficientes de correlación lineal entre las variables de respuesta y las fracciones de magnesio o algunas otras características del suelo	52
10. Magnesio intercambiable antes y después de la cosecha, en suelos fertilizados y sin fertilizar con magnesio	58
11. Magnesio absorbido por las plantas, expresado como porcentaje de Mg-intercambiable inicial del suelo	59

## LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
1. Líneas que representan la relación entre el magnesio restituído y los diferentes períodos de incubación.	42
2. Relaciones entre el magnesio reserva y el magnesio restituído después de 16 semanas de incubación.	45
3. Rendimiento relativo del ryegrass vs. contenido de carbón orgánico en el suelo	54
4. Absorción total de magnesio (mg extraídos/Kg suelo) en función del porcentaje de saturación de magnesio con respecto a la capacidad catiónica de cambio a pH 7	66
5. Absorción total de magnesio (mg extraídos/Kg suelo) en función del magnesio intercambiable del suelo.	67
6. Absorción relativa de magnesio por el tejido vegetal en función del magnesio intercambiable del suelo.	69
7. Absorción relativa de magnesio por el tejido vegetal en función del porcentaje de saturación de magnesio con respecto a la capacidad catiónica de cambio a pH 7.	70
8. Concentración de magnesio en el tejido vegetal del primer corte, en función del magnesio intercambiable del suelo.	71
9. Concentración de magnesio en el tejido vegetal del primer corte, en función del porcentaje de saturación de magnesio con respecto a la capacidad catiónica de cambio a pH 7.	72

## LISTA DE TABLAS DEL APENDICE

1. Rendimiento de la cosecha (en base seca) por materia y por corte.
2. Polinomios de segundo grado y coeficientes de determinación ( $R^2$ ) para la regresión entre Mg-intercambiable o porcentaje de saturación de magnesio y las variables de respuesta.
3. Cálculos para determinar el nivel crítico por el método matemático de Cate y Nelson (5).
4. Relaciones entre el calcio, el magnesio y el potasio intercambiables.
5. Porcentaje de saturación de magnesio. Porcentaje de arcilla y limo.
6. Equivalencia en el Sistema Americano de Clasificación de Suelos de las Asociaciones empleadas en el presente estudio.

## 1 - INTRODUCCION

En general, la mayoría de las fertilizaciones se dirigen a controlar la deficiencia de nitrógeno, fósforo y potasio y a controlar la acidez, siendo el magnesio frecuentemente ignorado.

Al irse tecnificando la agricultura en el país se empieza a poner de relieve la falta de investigación, en cuanto a elementos secundarios y microelementos, que permita evaluar la capacidad de mantener un suministro adecuado de ellos durante la cosecha.

En un país, como Colombia, donde se presentan condiciones de suelos ácidos (35), relaciones Ca/Mg invertidas (31) (32) (46), fuertes adiciones de cal (41), que pueden llevar a problemas de nutrición de magnesio en las plantas, es cada vez más importante tener conocimiento sobre la disponibilidad, velocidad de restitución y otras características de tal elemento en los suelos.

Con el interés de aportar algo al conocimiento de la dinámica y disponibilidad del magnesio en suelos de Colombia, se propuso el presente trabajo, en suelos de la zona andina de Cundinamarca, con los siguientes objetivos:

1. Evaluar estadísticamente el aporte de las diferentes fracciones de magnesio del suelo en el suministro del elemento a la planta.
2. Evaluar la influencia de algunas características del suelo como: pH, Ca/Mg,

Mg/K, porcentaje de saturación de magnesio, textura y contenido de materia orgánica, en la disponibilidad de magnesio.

3. Establecer la confiabilidad de diferentes índices de disponibilidad del magnesio para la planta.
4. Determinar la capacidad de restitución de magnesio intercambiable.

## 2 - REVISION DE LITERATURA

### 2.1 EL MAGNESIO EN EL SUELO

El contenido total del magnesio en el suelo es el resultado de su material parental, estado de madurez y fuerzas bioclimáticas (25)✓. Su cantidad, en los suelos no calcáreos, varía entre el 0,1 y el 1,0%. Se encuentra como constituyente de minerales primarios, secundarios, en forma intercambiable y en la solución del suelo (14).

En los minerales primarios generalmente se encuentra asociado con el hierro formando compuestos como el olivino, varios inosilicatos y la biotita. Una excepción la constituye la dolomita. La asociación con el hierro se pierde cuando éste se oxida a Fe(III) para formar compuestos insolubles y el magnesio se lixivia (55)✓

En los minerales secundarios puede presentarse por sustitución isomórfica dentro de la capa octaédrica de las estructuras cristalinas 2:1 (illitas, montmorillonitas) y/o también ocupando posiciones interlaminares como en la clorita y la vermiculita (29).

Mokwunye y Melsted (38) aceptan una distribución semejante a la anterior aunque hacen notar que la materia orgánica puede atrapar el magnesio en forma no intercambiable. Otra forma de magnesio en el suelo podría estar constituida por los compuestos Mg-Al-SiO<sub>2</sub>.

Según los autores anteriores citados por Thomson (55), las partículas más finas contienen mayor cantidad de magnesio que las más gruesas y en suelos de la zona templada y de la tropical encontraron la siguiente distribución del magnesio total: en arcilla del 51 al 70%, en limo del 22 al 42% y en arena del 0,1 al 11%.

Los mismos autores encontraron en suelos de las mismas zonas el siguiente orden de distribución del magnesio: En minerales primarios > soluble en ácido > intercambiable > acompañado por la materia orgánica; donde el soluble en ácido parece ser una función del tipo y naturaleza del coloide presente.

Las distribuciones encontradas por Chamorro (7) en suelos del Valle del Cauca y Sabana de Bogotá y por Téllez (53) en la Sabana de Bogotá, también siguieron el mismo orden.

Christenson (8) encontró que la concentración del magnesio en las fracciones del suelo disminuye al aumentar el tamaño de ellas; y según Salmon y Arnold (49) la fracción arcilla puede contener 2/3 del magnesio total del suelo.

## 2.2 EL MAGNESIO DISPONIBLE PARA LAS PLANTAS Y LA DINAMICA DEL ELEMENTO EN EL SUELO.

La solución del suelo es el medio nutritivo en el cual crecen las plantas. Mientras más alta sea la concentración en nutrimentos, más iones se transportarán a

las raíces por difusión y flujo de masa y más nutrimentos pueden ser tomados por las plantas (43).

Entonces, la rata de absorción de los elementos por las plantas, excepto bajo circunstancias extremas, de desbalance o concentración, está directamente relacionada con la concentración del nutrimento en el medio. En condiciones de campo, la composición de la solución del suelo varía debido a las propiedades del suelo, contenido de agua y poder de absorción de las plantas. Con respecto a los cationes, se puede asumir que su concentración está afectada por la cantidad en forma intercambiable, por la capacidad catiónica de cambio y por la clase de iones complementarios (44).

Según Lombin y Fayemi (27), el poder de suministro de un nutrimento por un suelo está gobernado por tres factores:

- La concentración del elemento en la solución del suelo.
- La cantidad del nutrimento en la fase sólida que está asociada con el mismo elemento en la solución.
- La rata de renovación de la concentración del elemento en la solución del suelo.

Las plantas toman el magnesio de la solución del suelo que está en equilibrio con el magnesio intercambiable (49). Nemeth et al (44) encontraron una relación entre el calcio y el magnesio intercambiables y su concentración en la solución del suelo, sin importar la textura del mismo. Para el Ca la relación es lineal y para el Mg cua-

drática. La mayor parte del magnesio total del suelo no es intercambiable, pero esa fracción es la responsable de renovar el magnesio intercambiable removido por la cosecha o lixiviado (49).

Algo del magnesio no intercambiable está realmente disponible para las plantas durante su crecimiento. Este magnesio puede ser el de la estructura cristalina o el interlaminar, ya que el magnesio puede liberarse de la cara de los cristales y de los extremos (8).

Según Salmon y Arnold (49) el magnesio se libera de las posiciones interlaminares en la vermiculita y la clorita, y en suelos de Suecia este proceso es más importante que la liberación más lenta del magnesio por las illitas.

La liberación del magnesio varía considerablemente con la composición de la fracción arcilla (29) (49) y para las arcillas de estructura 2:1 está relacionada directamente con la capacidad catiónica de cambio y la concentración del magnesio. En suelos con baja capacidad amortiguadora (buffer), el  $H^+$  liberado por las raíces, al tomar los cationes del suelo, puede ser utilizado para liberar el magnesio de los sitios no intercambiables y en tal situación la respuesta a la fertilización con magnesio puede no presentarse aún cuando el magnesio intercambiable sea bajo (29).

En un estudio sobre la fijación y liberación de magnesio en suelos de origen templado y tropical, Mokwunye y Melsted (39), encontraron que ni la arcilla, ni la fracción orgánica fijan el magnesio; que la cantidad de magnesio liberado de las formas

no intercambiables era muy pequeña y que no parecía existir un equilibrio entre la forma intercambiable y la no intercambiable. Además el magnesio liberado no siguió el orden de la fertilidad del magnesio en varios suelos, pues los suelos con mayor cantidad de Mg-total e intercambiable no liberaron cantidades mayores que los otros suelos. Según Sumner et al (52) la fijación puede ser importante a pH neutro o alcalino y señala 4 mecanismos por los cuales se puede llevar a cabo.

Karlen et al (24) encontraron que cuando el contenido de agua aumenta en el suelo la concentración de los cationes no disminuye proporcionalmente. Así, la concentración de potasio disminuye aproximadamente dos veces, la de magnesio, cuatro y la de calcio, seis, cuando el contenido de agua aumenta de 10 a 40% en volumen.

## 2.3 ALGUNOS FACTORES DEL SUELO QUE AFECTAN LA ABSORCIÓN DEL MAGNESIO POR LAS PLANTAS.

### 2.3.1 Relación Calcio-Magnesio

La relación Ca/Mg, alta, según diferentes autores disminuye la absorción del magnesio, pero cuando se encalan suelos ácidos puede no cambiar o aumentar. Elevando el pH a 6,5 se aumenta la absorción del magnesio en suelos no deficientes y se disminuye en los deficientes (10). En trabajos con suelos de Nueva Zelanda, el encalado disminuyó la concentración del magnesio en el forraje (13); esto llevó a hacer énfasis en que las recomendaciones de encalar se hagan teniendo en cuenta la disponibilidad de otros cationes como potasio y magnesio.

Sumner et al (52) observaron que las aplicaciones altas de cal disminuían el magnesio intercambiable y que esta disminución estaba acompañada por un descenso en el magnesio del tejido vegetal. Ellos suponen que el magnesio se hace menos disponible porque se fija al acercarse el pH a la neutralidad. Una relación Ca/Mg baja, 0,33 ó menos, indujo deficiencia de calcio en la remolacha azucarera cuando se hizo un cultivo en solución, aunque la concentración de calcio fuese alta. La relación Ca/Mg alta disminuyó la absorción de magnesio pero no indujo su deficiencia (40).

Se ha encontrado correlación negativa y significativa entre el magnesio en tejidos de maíz y el calcio en el suelo (1). Las relaciones Ca/Mg mayores de 10, acompañadas con altas fertilizaciones de K y N, pueden inducir deficiencias de magnesio (4).

### 2.3.2 Relación Magnesio-Potasio

La mayor adsorción de magnesio en los sitios de intercambio y la absorción preferencial de potasio por las plantas puede producir deficiencias de magnesio, cuando se emplean fertilizantes potásicos en suelos bajos en él (55). Algo semejante puede producir la adición de fertilizantes amoniacales.

Varios investigadores han obtenido correlaciones negativas entre el potasio y el magnesio en la planta (4) ó el magnesio en la planta y el potasio en el suelo (28) (48), ó el potasio en la planta y el magnesio en el suelo (1). También se ha encontrado que las fertilizaciones fuertes con potasio y nitrógeno pueden provocar una deficiencia de magnesio en ryegrass (45).

### 2.3.3 Contenido de materia orgánica

El magnesio en el tejido de maíz correlacionó negativamente con el porcentaje de materia orgánica en el suelo. La correlación parcial positiva entre el potasio en la planta y materia orgánica en el suelo y negativa para el calcio y el magnesio en la planta sugiere que la materia orgánica une más fuertemente el calcio y el magnesio que el potasio (1).

### 2.3.4 Nitrógeno

La fertilización con nitrógeno y magnesio fué aditiva para aumentar el magnesio en la planta (33). Esto está en concordancia con lo sugerido por Agboola y Corey (1) sobre la influencia del magnesio en la rata de liberación del nitrógeno de la materia orgánica del suelo.

## 2.4 INDICES DE DISPONIBILIDAD DEL MAGNESIO PARA LA PLANTA

Teniendo en cuenta los antagonismos entre cationes, las diferentes formas y equilibrios del magnesio en el suelo y una nutrición vegetal adecuada se han diseñado varias metodologías para evaluar la disponibilidad del elemento.

Una de las técnicas más empleadas es la determinación del magnesio intercambiable, generalmente, extrayéndolo con acetato de amonio 1N y neutro. Aunque a menudo esta determinación correlaciona significativamente con el magnesio absorbido por la planta (3) (25) (26), el coeficiente de determinación ( $R^2$ ) muchas veces es bajo. Por

lo tanto se han hecho estudios tendientes a buscar expresiones que correlacionen más adecuadamente con lo disponible para la planta; entre estos índices pueden contarse: porcentaje de saturación de magnesio, relación Ca/Mg, relación Mg/K.

Salmon (48), Turner y Neall (56) proponen el empleo de expresiones más complejas que han dado mejor correlación como son: a potasio constante  $\sqrt{aMg/a(Ca+Mg)}$ , donde a representa la actividad de los cationes en la solución del suelo ó el índice de relación: Mg-intercambiable/(Ca+Mg+K) int. + pH, respectivamente. Alston (3) también sugiere que se usen relaciones de actividad iónica para evaluar la disponibilidad.

En suelos de sabana de Nigeria, Lombin (25) encontró un coeficiente de determinación de 0,56\*\*\* para la relación entre el magnesio absorbido por las plantas y el Mg-intercambiable del suelo. Sin embargo, obtuvo una mejor predicción del magnesio absorbido por las plantas con una regresión lineal múltiple, seleccionando como variables independientes Mg-intercambiable, Ca-intercambiable, relación Mg/K y materia orgánica del suelo. En este caso  $R^2$  fué de 0,74\*\*\* y si se cambiaba Ca-intercambiable por pH, era de 0,75. De las variables independientes tenidas en cuenta, el porcentaje de materia orgánica no presentó un cambio de  $R^2$  significativo y cuando se retiró de la ecuación, el nuevo coeficiente de determinación fué de 0,72\*\*\*.

El mismo autor encontró las siguientes correlaciones entre el Mg-removido por plantas y algunas medidas del suelo. Correlación significativa positiva con: pH, por-

centaje de materia orgánica, capacidad catiónica de cambio, Ca-intercambiable, porcentaje de saturación de magnesio y Mg-intercambiable.

El Mg-absorbido por las plantas también presentó correlaciones significativas negativas con: el K-intercambiable y la relación K/Mg; y no significativa con el porcentaje de arcilla más limo y la relación Mg/Ca.

Para determinar la habilidad de un suelo para restituir su magnesio intercambiable se han empleado varias técnicas como son: cultivo exhaustivo (el más apto pero el más costoso), incubación y métodos químicos, empleando soluciones capaces de extraer el magnesio no intercambiable pero si disponible para las plantas. Entre estos últimos se puede señalar el que emplea solución de acetato de amonio N a pH 1 (26) (27) y el del ácido clorhídrico 3N (33). La validez de estos métodos es motivo de investigación (29).

## 2.5 NIVELES CRITICOS PARA LA INTERPRETACION DE LA DISPONIBILIDAD DEL MAGNESIO.

Una vez establecida la correlación entre el magnesio absorbido por las plantas y el extraído por un método de análisis, el siguiente paso para interpretar ese análisis es el establecimiento de un nivel crítico.

Cate y Nelson (5) idearon 2 procesos, uno gráfico y otro matemático, para acercarse a la línea que divide la probabilidad de respuesta en alta y baja, ó sea el

nivel crítico. En el proceso gráfico dos líneas, una vertical y otra horizontal, se superponen a un diagrama de puntos, que representan la relación entre el rendimiento relativo (Y) de un cultivo y el nivel de un elemento en el suelo (X), de tal manera que los puntos en los cuadrantes positivos sean los máximos posibles. El punto donde la línea vertical intercepta el eje X se emplea para dividir los datos en dos clases y se llama nivel crítico.

En el proceso matemático las parejas de valores YX se colocan en orden ascendente de X y luego se van dividiendo los datos de Y en dos poblaciones usando valores tentativos de nivel crítico de X. Para cada valor tentativo se calcula un  $R^2$  de predicción que es igual a la siguiente relación: 
$$R^2 = \frac{SCT - SC_1 - SC_2}{SCT}$$

SCT : suma de cuadrados para todos los valores de Y

SC<sub>1</sub> : suma de cuadrados de Y de la población 1

SC<sub>2</sub> : suma de cuadrados de Y de la población 2

Al  $R^2$  máximo se le determina el X correspondiente, para tomarlo como nivel crítico.

Un  $R^2$  máximo está indicando la mayor eficiencia del proceso en dividir en dos poblaciones con diferentes promedios, los datos originales.

El nivel crítico de un nutrimento puede definirse como el nivel de la forma disponible debajo del cual la planta crece y se desarrolla restringidamente (26), y bajo el cual se espera respuesta cuando se aplica como fertilizante.

En la literatura pueden encontrarse varios niveles críticos de magnesio para las dife-

rentes determinaciones, en suelos, plantas, etc. Algunos de ellos son los siguientes:

### 2.5.1 Mg-intercambiable

Mokwunye y Melsted (39) establecen los niveles críticos para cultivos agronómicos y comerciales entre 0,6 y 4,0 meq/100 g de suelo. Lombin y Fayemi (26) encontraron en suelos de Nigeria el nivel crítico entre 0,29 a 0,35 meq/100 g, nivel que estaba dentro del rango de 0,20 a 0,42 meq/100 g establecido (28).

Sharma et al (50) clasificaron algunos suelos de la India como deficientes en magnesio, si el intercambiable era menor de 10 mg/100 g suelo (0,83 meq/100 g) y ricos si tenían más de 20 mg de magnesio/100 g de suelo (1,7 meq/100 g).

El maíz en invernadero presentó síntomas persistentes de deficiencia cuando el Mg-intercambiable era de 21-22 ppm (0,17-0,18 meq/100 g) (29).

Schachtschabel citado por Alston (3) agrupó los suelos por textura y dió valores críticos de Mg-intercambiable así:

Suelos ligeros	5 mg (0,4 meq)/100 g
Suelos medios	7 mg (0,6 meq)/100 g
Suelos pesados	12 mg (1,0 meq)/100 g

Según Alston, esta clasificación no ha sido siempre satisfactoria.

En Inglaterra y Gales (6) dividen los suelos en tres clases según el contenido de Mg-intercambiable, así:

Bajos	0 - 30 ppm
Medios	30 - 60 ppm
Altos	sobre 60 ppm

En España (12) el nivel de magnesio se considera pobre si el Mg-intercambiable está entre 0,6 y 2,5 meq/100 g, medio de 2,5 a 5,0 y alto entre 5,0 y 7,5 meq/100 g.

Para Lora (30) el Mg-intercambiable es bajo si es menor de 1,5 meq/100 g y alto cuando es mayor de 2,5 meq/100 g.

En Escocia (6) se necesitan 30 ppm de Mg-intercambiable para obtener un rendimiento máximo en pastos, pero una cantidad tan grande como 160 ppm para que el magnesio esté en concentración adecuada en el pasto.

También Karlen et al (23), hacen la observación de que se requiere mayor concentración de magnesio en el pasto para prevenir la tetania que para obtener el máximo rendimiento (en Kansas el Mg-intercambiable de 2,3 a 4,4 meq/100 g no alcanzó a producir un forraje con el 0,2% de magnesio).

#### 2.5.2 Porcentaje de saturación de magnesio

Si el porcentaje de saturación es menor del 6% hay respuesta, en crecimiento de los pastos, a la adición de magnesio (23).

En maíz se presentaron deficiencias para un porcentaje de saturación de magnesio de

5% o menor (29). Según Lombin y Fayemi (26) los porcentajes de saturación normales de magnesio establecidos por varios autores son 4%, 6%, 10% y el rango de 5 - 10%.

Según Lora (30) una saturación menor del 15% es baja, entre 15 y 25% media y mayor de 25%, alta.

### 2.5.3 Relación Mg/K

Se ha establecido un nivel adecuado de la relación  $Mg/K = 2$ . Para un potasio alto se obtuvieron deficiencias de magnesio en las plantas aún cuando este elemento tenía un valor de 1,2 meq/100 g en la forma intercambiable (28).

### 2.5.4 Combinación de determinaciones

Dado lo complejo de la situación, hay tendencia a combinar por lo menos dos determinaciones para dar una idea mejor del magnesio disponible para las plantas (3).

Guerrero (18) propone utilizar en Colombia, aunque en forma tentativa y cuidadosa por la ausencia de estudios para la zona, la siguiente escala para el magnesio:

Nivel de Disponibilidad	Mg-Intercambiable meq/100 g	% saturación
Bajo	< 0,20	< 6%
Medio	0,20 - 0,40	6 - 10%
Alto	> 0,40	> 10%

Lora (30) recomienda tener en cuenta el Mg-intercambiable, el porcentaje de saturación de magnesio y la relación Ca : Mg : K en el suelo.

### 3 - MATERIALES Y METODOS

#### 3.1 SUELOS

##### 3.1.1 Características generales de la Región de estudio

Localización: comprende suelos de la cuenca hidrográfica alta del río Bogotá (20), ó sea de la Sabana de Bogotá y sus alrededores.

Clima y Ecología (35): el piso de la cuenca del río Bogotá está situado entre 2.500 y 2.700 m. sobre el nivel del mar y en las colinas llega hasta 4.000.

Las formaciones vegetales pertenecen a los tipos: Bosque Seco Montano Bajo y Bosque Húmedo Montano.

La zona del Bosque Seco Montano Bajo comprende el Valle del río Bogotá y la planicie de origen lacustre. Las lluvias oscilan entre 500 y 1.000 mm. anuales y la temperatura entre 12 y 18°C. El Bosque Húmedo Montano se inicia a los 3.000 m., la precipitación es similar a la zona anterior y la temperatura oscila entre 6 y 12°C.

Aptitud de uso de la tierra: para la región Sabana de Bogotá y la zona quebrada que la rodea, se ha establecido que un 60% de ella está en las Clases I a IV, de acuerdo con su capacidad productiva. A las Clases I y II pertenece un 20%. Las limitaciones principales de estos suelos son: drenaje pobre, texturas arcillosas, profundidad efectiva escasa, baja fertilidad y susceptibilidad a la erosión (22).

### 3.1.2 Características de los Suelos estudiados

El material parental de los suelos Bosque Seco Montano Bajo consta de sedimentos aluviales y lacustres pertenecientes al Cretáceo, Eoceno, Oligoceno, Plioceno y Pleistoceno. En los suelos de la zona Bosque Húmedo Montano predominan materiales del Cretáceo.

Según Guerrero (17) la mayoría de los suelos de la Sabana de Bogotá, tienen como material parental sedimentos aluviales muy ácidos. Se han encontrado enterradas capas discontinuas de cenizas volcánicas que parecen pertenecer a diferentes deposiciones.

El mismo autor indica que la ceniza volcánica es un material parental común en la región de las Cordilleras Andinas Colombianas y que estos suelos pueden considerarse como rejuvenecidos.

Muñoz (42) señala que en la región predominan los materiales secundarios de naturaleza amorfa, alofánico y además son predominantes los contenidos de gíbsita, metahaloisita y haloisita.

Clasificación: De acuerdo con el sistema americano de clasificación predominan los suelos Dystrandeps (42).

En el estudio de la clasificación de suelos de la cuenca alta del río Bogotá, citado por Medina y Luna (35) se contemplan las siguientes agrupaciones: a) Suelos de la parte plana; b) Suelos de Coluvios; y c) Suelos de Colinas. Dentro de cada agru-

pación se encuentran asociaciones de series que constituyen unidades cartográficas.

Los suelos para el presente estudio se tomaron en diferentes asociaciones (con posibles problemas en la disponibilidad del magnesio) de acuerdo con el Mapa de Suelos de la Cuenca Hidrográfica Alta del Río Bogotá (20).

Se tomaron más muestras de la zona quebrada por su mayor variabilidad e interés. Veinte se consideró un número suficientemente grande para dar resultados confiables y tener por lo menos dos muestras por asociación; también adecuado para el manejo del experimento. Las muestras se tomaron entre 0 y 20 cm. de profundidad, y se distribuyeron así:

AGRUPACION	ASOCIACION	Número de Identificación del Suelo
Suelos de la Parte Plana	Tibaitatá-Zipacquirá Corzo	12, 18
	Bermeo	15, 16, 17
Suelos de la Parte Quebrada	Cabrera-Cruz Verde	2, 3
	Cabrera-Cogua	1, 6, 7, 8, 9, 10, 11
	Facatativá-Cabrera	13, 14, 19, 20
	Bojacá-Cogua-Techo	4, 5

Tabla 1. Algunas características de los 20 suelos bajo estudio.

Identificación	pH:H <sub>2</sub> O	pH NaF	C-orgánico- co %	P-disponible ppm	Ca	Mg	K	Na	Al	CCC	pH:7	Textura
1	7,0	8,6	1,85	36	11,1	1,9	0,8	2,1	0,0	18,6		FArc 1/
2	6,0	9,5	12,67	11	6,1	5,7	6,1	0,8	0,4	45,7		FArcAr
3	5,7	9,5	17,70	12	5,0	1,8	1,1	0,8	2,0	66,6		FArc
4	6,1	7,5	1,36	23	5,9	2,1	0,2	0,8	0,0	13,7		FAr
5	6,0	7,7	1,42	14	3,1	1,4	0,4	0,5	0,0	7,2		FArcAr
6	5,7	8,5	2,78	2	3,1	1,8	0,9	1,4	0,7	24,2		FArc
7	5,5	8,0	4,99	19	4,1	1,8	0,4	0,6	0,9	16,2		FArc
8	5,5	7,5	4,17	6	4,7	2,8	0,3	0,2	0,3	15,0		FArc
9	6,1	7,9	6,99	24	19,5	3,2	0,6	1,3	0,2	25,7		Arc
10	5,2	8,3	4,63	7	1,2	1,0	0,4	0,3	3,7	19,5		Arc
11	5,2	8,3	3,99	3	1,6	1,3	0,4	0,8	2,5	18,5		Arc
12	5,8	10,1	14,81	8	6,7	3,1	1,2	0,5	0,7	47,8		FL
13	5,1	8,9	6,96	4	2,2	1,3	0,7	0,7	2,6	31,5		Arc
14	6,0	10,6	23,89	4	5,6	2,2	3,2	0,3	0,7	73,3		FL
15	5,9	10,0	15,87	16	15,5	4,1	3,7	0,4	0,2	55,7		FArc
16	5,4	10,4	21,49	3	4,4	1,6	0,4	0,6	1,7	71,4		FL
17	5,6	9,8	16,14	42	4,1	1,5	2,2	0,2	1,4	46,8		FArc
18	5,9	7,9	3,95	9	11,4	3,5	0,3	1,6	0,2	23,3		Arc
19	6,0	10,2	13,64	40	10,4	1,2	1,6	0,5	0,9	57,7		FArc
20	5,7	10,8	12,45	15	6,7	0,7	1,8	0,5	0,2	49,7		FAr

1/ Ar: arenoso      Arc: arcilloso      L: limoso      F: franco

Algunas características químicas y físicas de los suelos, que aparecen en la Tabla 1, pueden resumirse así:

El pH varió de 5,15 a 7,05; el porcentaje de materia orgánica de 1,36 a 23,89%; la capacidad catiónica de cambio (CCC) de 7,2 a 73,3 meq/100 g predominando los valores altos, mayores de 20 meq/100 g.

El Ca-intercambiable varió de 1,2 a 19,5 meq/100 g; el Mg-intercambiable de 0,7 a 5,7 meq/100 g; el K-intercambiable de 0,23 a 6,13 meq/100 g; y el Na-intercambiable de 0,18 a 2,07 meq/100 g.

La acidez de cambio estuvo entre 0,0 y 3,7 meq/100 g, predominando los valores menores de 1 meq/100 g suelo.

El fósforo disponible (Bray II) varió entre 2 y 42 ppm, con predominio de los valores menores de 20 ppm.

Al tomar como criterio de la presencia de alofana el pH en NaF, se encontró que de los 20 suelos, 9 tenían pH en NaF mayor o igual a 9,5, o sea que, más del 50% de la fracción arcilla estaba compuesta por material alofánico.

La textura debe tomarse como aproximada debido a la presencia de alofana y al alto contenido de materia orgánica en algunos suelos.

### 3.1.3 Mineralogía de los Suelos estudiados

Según Mejía (36) la fracción arcilla de los primeros centímetros de perfiles modales de las series Cabrera, Cogua, Facatativá, Corzo, Cruz Verde, Bojacá y Tibaitatá, está compuesta en su mayoría por alofana, haloisita, caolinita y cuarzo en diferentes proporciones; presentándose en algunos casos y en menor cantidad, micas. La serie Cruz Verde constituye una excepción pues su fracción arcilla está formada especialmente por vermiculita, siguiéndole caolinita, illita y goetita.

En las arenas los minerales densos varían del 24 al 1% siendo más abundantes en las series Facatativá y Bermeo, y mínimos en Cogua y Bojacá. En la fracción densa de la arena, los ferromagnesianos (hornblenda e hiperstena especialmente) constituyeron en todos los casos, excepto en la serie Bojacá, más del 50% de los minerales presentes.

### 3.2 CARACTERIZACION DE LOS SUELOS

Se siguieron los métodos adoptados por el Instituto Geográfico "Agustín Codazzi" (21):

C-orgánico - Método de Walkey-Black. Para los cálculos se empleó el factor de corrección (f) de 1,33 recomendado por Allison (3)

P-disponible - Método Bray II, que emplea como extractante una solución de HCl 0.1 N y  $\text{NH}_4\text{F}$  0,03 N

pH - Con electrodo de vidrio, relación agua destilada a suelo: 1:1

Capacidad Catiónica de Cambio (CCC) - con acetato de amonio 1 normal y a pH 7. Cinco gramos de suelos se agitaron por 10 minutos con 30 cc de solución de acetato de amonio. La determinación del amonio intercambiado se hizo por el método del formaldehído.

Al-cambiable - por el método de Yuan, empleando 10 gramos de suelo, y 30 cc de KCl.

Ca y Mg - intercambiables - Determinados en el extracto de acetato de amonio, con EDTA, sin destruir el exceso de sales de amonio.

K y Na - intercambiables - En el extracto de acetato de amonio, sin destruir el exceso de sales de amonio, por fotometría de llama.

Textura - por el método del hidrómetro de Bouyoucos

pH en NaF - 1,0 gramo de suelo más 50 cc NaF 1N se agitó dos minutos y se leyó el pH con electrodo de vidrio (15).

### 3.3 CARACTERIZACION DEL MAGNESIO

#### 3.3.1 Fraccionamiento del magnesio

Se basó en el propuesto por Mokwunye y Melsted (38), que divide el magnesio del suelo en: Mg-total, Mg-estructural, Mg-soluble en ácido, Mg-unido

a la materia orgánica y Mg-intercambiable. Como no se siguió exactamente la metodología propuesta por ellos, se describe a continuación:

Magnesio Total - 0,1000 g de suelo molido y pasado por tamiz 0,4 mm se fundió con 1,0 g de carbonato de sodio, en crisol de platino. El resultado de la fusión se disolvió con 50 cc de ácido clorhídrico 1N y se llevó a un volumen final de 100 cc con agua destilada. Se filtró antes de determinar el magnesio.

Magnesio Intercambiable - 1,000 g de suelo, pasado por tamiz de 2 mm, se agitó con 20 cc de acetato de amonio normal y neutro por 40-60 minutos, se centrifugó 10 minutos a 2.000 RPM y se separó; luego se agregaron porciones de 20 cc de acetato y se agitó por 10 minutos, se centrifugó y separó cada vez hasta obtener 100 cc de extracto.

Magnesio Unido a la Materia Orgánica - al suelo procedente del paso anterior, se le agregó agua oxigenada al 10%, en porciones de 20 cc. La reacción, a temperatura ambiente, se dió por terminada cuando no se desprendieron burbujas. Se centrifugó 10 minutos a 2.000 RPM. Ante la dificultad para centrifugar las arcillas en este caso, se agregaron 5 cc de acetato de amonio normal y neutro, inmediatamente antes de hacer las centrifugaciones, a aquellos extractos procedentes de la reacción con el agua oxigenada.

Magnesio Soluble en Acido - al suelo procedente de la reacción con agua oxigenada, se le agregó 30 cc de  $\text{HNO}_3$  y se calentó por 15 minutos. Se completó a un

volumen de 100 cc con ácido nítrico 0,2 normal y luego se filtró.

Magnesio Mineral o Estructural - se determinó por diferencia entre el magnesio total y las otras fracciones: intercambiable, unido a la materia orgánica y soluble en ácido, debido a que en estos suelos la determinación directa no es adecuada (7) (53).

### 3.3.2 Otras fracciones de magnesio

Magnesio no cambiabile - 2,00 gramos de suelo (2 mm de diámetro) se agitaron con 50 cc de acetato de amonio N y pH 1 durante una hora, después se filtró y se determinó el magnesio en el extracto.

Magnesio Soluble en Agua - (Método de Heald, según Téllez (53)). 5,0 g de suelo seco al aire y pasado por tamiz de 2 mm, se agitaron con 120 cc de agua destilada durante 40-60 minutos, se centrifugó y se filtró por papel banda azul, para obtener una solución clara.

Magnesio Reserva - magnesio soluble en HCl 3N menos magnesio intercambiable a pH 7.

Magnesio Soluble en HCl (34) - 1,00 g de suelo más 20 cc de HCl 3N. Se calentó por una hora al baño de María, se llevó con agua destilada a 100 cc de volumen final y se filtró.

Todas las determinaciones, excepto la del magnesio total se hicieron por triplicado.

El magnesio se determinó en todos los casos por absorción atómica, empleando solución de cloruro de lantano al 0,5% en lantano como diluyente.

### 3.4 RESTITUCION DEL MAGNESIO INTERCAMBIABLE

Se usó como base la metodología de Mokwunye y Melsted (39). 0,500 g de suelo seco al aire y de 2 mm de diámetro máximo se agitaron, en tubo de ensayo, con 10 cc de acetato de amonio N y neutro por 40-60 minutos, se centrifugó durante 10 minutos a 2.000 RPM y se separó. Después se agregaron 2 porciones de 10 cc de acetato de amonio, se agitó 10 minutos cada vez y se centrifugó. Este extracto se completó a 50 cc con la solución de acetato de amonio.

A continuación el suelo se lavó dos veces con porciones de 5 cc de alcohol etílico, para remover el exceso de amonio. Después se lavó dos veces con porciones de 10 cc de solución de  $\text{CaCl}_2$  0,001 M. Para cada lavado se agitó 10 minutos y el líquido se retiró por centrifugación.

Al suelo en cada tubo se le agregó una gota de tolueno, se tapó y guardó a temperatura ambiente y en la oscuridad, para las determinaciones posteriores.

Este proceso se realizó por triplicado a la cero, dos, cuatro, ocho y dieciseis semanas, en los mismos tubos. La determinación de magnesio en los extractos se hizo por absorción atómica diluyéndolo con solución de cloruro de lantano al 0,5% en lantano.

### 3.5 MAGNESIO, CALCIO Y POTASIO INTERCAMBIABLES ANTES Y DESPUES DE LA COSECHA

#### 3.5.1 Magnesio, Calcio y Potasio intercambiables antes de la cosecha

Se hizo con la metodología propuesta por Lombin y Fayemi (27) en la cual 2,00 gramos de suelo (de diámetro menor de 2 mm) se agitan durante una hora con acetato de amonio normal y neutro en relación 1:25. Los cationes se determinaron por absorción atómica empleando el mismo diluyente de los casos anteriores. Este se denominará método rápido para determinar los cationes intercambiables.

#### 3.5.2 Bases después de la cosecha

La metodología fué igual a la anterior. Se determinaron en el suelo secado al aire de cada una de las 120 materas empleadas en el ensayo biológico. Para los cálculos se asumió una humedad igual a la inicial de los suelos.

### 3.6 ENSAYO EN MATERAS

#### 3.6.1 Suelos

Los suelos se secaron al aire y se pasaron por tamiz de 1 cm. De cada suelo se prepararon 6 materas con 0,800 Kg cada una.

Los suelos se desinfectaron con solución de formol al 5%, para evitar problemas del cultivo, ya que se habían almacenado húmedos algún tiempo. Fue necesario sa-

carlos de las materas para lograr la eliminación total del formol.

### 3.6.2 Fertilización

Todas las materas recibieron antes de la siembra la siguiente fertilización:

Urea: 200 Kg por hectárea

Potasio: 100 Kg de  $K_2O$  por hectárea. Se empleó  $KH_2PO_4$

Fósforo: Aquellos suelos con más de 10 ppm de fósforo disponible, recibieron 400 Kg de  $P_2O_5$  por hectárea, y los con menos de 10 ppm 600 Kg de  $P_2O_5$  por hectárea. Se emplearon  $KH_2PO_4$  y  $NaH_2PO_4$ .

Se tomó como peso de una hectárea  $2 \times 10^6$  Kg.

Después del primer corte, se les agregó úrea 20 Kg/Ha, Zn (como  $ZnSO_4$ ) y cobre (como  $CuSO_4$ ): 0,3 ppm de cada uno y Mo (como  $MoO_4Na_2$ ): 0,1 ppm. Todos los fertilizantes se agregaron en solución.

### 3.6.3 Adición del magnesio

Tres materas de cada suelo recibieron 2 meq de Mg/100 g de suelo. Las otras tres no recibieron magnesio. El magnesio se agregó como  $MgSO_4$  en solución. No se agregó azufre a los suelos no fertilizados con magnesio porque según Guerrero y Burbano (19) los suelos de la Sabana de Bogotá no responden a la adición de ese elemento.

#### 3.6.4 Siembra

Se sembró ryegrass (Lolium hybridum) variedad tetrelite. Las plantas se ralearon, dos semanas después de la siembra, para dejar 25 por matera.

#### 3.6.5 Cosecha

Se hicieron tres cortes, cada dos meses, empezando a contarse una semana después de la siembra, o sea cuando había germinado la mayoría de las semillas. El corte se hizo con tijeras, a un centímetro del suelo.

#### 3.6.6 Diseño y localización del experimento

Las materas estuvieron al aire libre en Bogotá (2.600 metros sobre el nivel del mar, 1000 mm de precipitación anual y 14°C de temperatura promedio). Los cuatro primeros meses se protegieron con una cubierta de plástico transparente. Se regaron con agua destilada en cantidad que varió según la temperatura reinante.

La distribución de las materas fue completamente al azar.

### 3.7 ANALISIS DEL MATERIAL VEGETAL

#### 3.7.1 Determinación del peso seco

El material recién cortado se lavó rápidamente con agua destilada, se empacó en bolsas de papel y se secó en estufa durante 48 horas a 70°C. Después de seco y pesado se pasó por malla 40.

### 3.7.2 Digestión - Método empleado en el Departamento de Química de la Universidad Nacional de Colombia, Bogotá.

A 0,1000 g de la muestra molida y seca se le agregó 1 cc de ácido sulfúrico al 5% en alcohol etílico y se prendió. El residuo se llevó a la mufla 3 horas a 500°C. Una vez enfriado, se le agregó 5 cc de HCl 1N y se calentó en plancha durante 1 hora, después se pasó a un matraz aforado de 100 cc y se completó a volumen con agua destilada. Se filtró y se hicieron las lecturas de magnesio por absorción atómica empleando cloruro de lantano en solución al 0,5% con relación al lantano, como diluyente.

### 3.8 VARIABLES DE RESPUESTA

Se seleccionaron:

Rendimiento relativo de la planta

Absorción total de magnesio por la planta de 1000 g de suelo seco

Absorción relativa de magnesio

Porcentaje de magnesio en el tejido vegetal

### 3.9 ANALISIS ESTADISTICO

Pruebas de t-student de una cola, para evaluar en cada suelo la respuesta a la aplicación de magnesio.

Correlación lineal simple: entre algunas de las fracciones de magnesio del suelo; entre

las variables de respuesta y las diferentes fracciones de magnesio en el suelo; y entre las variables de respuesta y algunas de las características del suelo. Esto se estableció con todos los suelos y con ellos divididos de acuerdo al pH en NaF.

Regresión lineal múltiple y eliminación de variables independientes. Se estableció para el modelo general:

$$Y_i = \beta_0 i + \beta_1 i X_1 + \dots + \beta_8 i X_8 + \epsilon_i$$

Donde:  $i = 1, 2$

$Y_1$  = absorción total de magnesio por la planta (mg/Kg de suelo)

$Y_2$  = concentración de magnesio en la planta (%)

$X_1$  = Mg-minerales primarios (meq/100 g)

$X_2$  = Mg-soluble en ácido (meq/100 g)

$X_3$  = Mg-intercambiable (meq/100 g)

$X_4$  = Mg-unido a la materia orgánica (meq/100 g)

$X_5$  = Saturación de Mg con respecto a CCC pH:7 (%)

$X_6$  = Saturación de Mg con respecto a CCC efectiva (%)

$X_7$  = Relación Ca/Mg

$X_8$  = Relación Mg/K

Se asumió que las variables independientes se midieron sin error y que las dependientes se distribuyeron normal e independientemente. Se hizo una eliminación de variables independientes en forma ascendente y descendente combinada y por separado para evaluar

la importancia relativa de ellas en la explicación de las variables dependientes.

Búsqueda de la correlación entre las variables de respuesta y los valores de Mg obtenidos por restitución en:

- a) el método de incubación
- b) la extracción del Mg-reserva

Evaluación del aporte cuadrático en la explicación de las variables de respuesta, cuando se usaron como variables independientes el Mg-intercambiable o el porcentaje de saturación de Mg.

### 3.10 DETERMINACION DEL NIVEL CRITICO

Por el método gráfico de los cuadrantes y por el método matemático diseñados por Cate y Nelson (5) y empleado éste último por Lombin y Fayemi (26).

## 4 - RESULTADOS Y DISCUSION

### 4.1 FRACCIONES DE MAGNESIO

Con respecto a las diferentes fracciones de magnesio, cuyos valores aparecen en la Tabla 2, se puede observar lo siguiente:

Magnesio total: sus valores estuvieron entre 15,80 y 66,03 meq/100 g, con un promedio de 38,39 meq/100 g. Los valores más altos estuvieron asociados con los suelos con pH en NaF mayor o igual a 9,5, para estos suelos el promedio fue de 52,29 variando los valores entre 26,67 y 66,03 meq/100 g; para los restantes fue de 27,01 meq/100 g oscilando entre 15,80 y 42,91 meq/100 g.

Que los suelos con pH en NaF mayor o igual a 9,5 hayan resultado más altos en magnesio está de acuerdo con lo encontrado por Téllez (53) en suelos de la Sabana de Bogotá. Además, Turner y Neall (56) trabajando con suelos derivados de cenizas volcánicas de Nueva Zelandia, donde obtuvieron valores más altos, de 98 a 141 meq/100 g, afirman que el magnesio total refleja las reservas de magnesio típicamente altas, asociadas con suelos derivados de cenizas andesíticas.

De acuerdo con Metson y Gibson (37) los suelos estudiados pueden considerarse: bajos en magnesio total los de pH menor de 9,5 y medios los de pH mayor o igual a 9,5.

Magnesio asociado a los minerales primarios: constituyó la fracción más grande en los suelos estudiados. Sus valores oscilaron entre 9,96 y 60,98 meq/100 g, con un promedio

Tabla 2. Fracciones de magnesio en los suelos estudiados.

Suelo	Mg-inter- cambiable	Mg-unido M. org.	Mg-soluble en ácido	Mg-min. primarios	Mg-total meq/100 g 1/	Mg-soluble en agua	Mg-no inter. disponible	Mg-inter. pH:1	Mg-reserva
1	1,65	0,25	2,86	15,64	20,40	0,085	0,17	2,08	5,81
2	5,19	0,88	5,19	15,41	26,67	0,024	-0,36	5,37	4,95
3	2,12	0,18	6,50	35,08	43,88	0,043	0,20	1,98	8,84
4	2,41	0,24	1,86	23,45	27,96	0,035	0,14	2,20	7,80
5	1,50	0,55	0,87	15,68	18,60	0,034	-0,07	1,36	2,35
6	2,11	0,30	0,85	16,70	19,96	0,019	-0,05	1,80	1,85
7	2,08	0,38	2,90	37,55	42,91	0,046	-0,10	1,67	1,04
8	3,00	0,38	0,82	24,52	28,72	0,050	-0,09	2,74	4,82
9	4,15	0,60	2,65	21,93	29,33	0,057	0,23	3,39	2,08
10	1,03	0,61	7,78	16,77	26,19	0,044	-0,20	0,81	6,33
11	1,10	0,86	3,88	9,96	15,80	0,035	-0,06	1,22	2,74
12	2,99	0,24	3,45	43,29	49,97	0,102	0,08	3,22	5,74
13	1,44	0,59	4,37	18,51	24,91	0,010	-0,07	1,19	3,16
14	2,49	0,27	2,73	55,85	61,34	0,019	-0,06	2,10	19,09
15	5,13	1,08	3,89	43,86	53,96	0,050	0,27	4,40	16,32
16	1,81	0,71	2,53	60,98	66,03	0,029	-0,06	1,57	14,82
17	1,76	0,73	3,24	46,34	52,07	0,036	0,06	1,57	9,27
18	4,05	0,44	6,18	31,66	42,32	0,178	-0,12	3,36	3,55
19	1,07	0,52	2,92	53,61	58,12	0,045	-0,08	1,15	6,40
20	1,12	0,40	2,59	54,49	58,60	0,027	0,08	0,82	10,93
Promedio	2,41	0,51	3,40	32,06	38,39	0,048	-0,01	2,20	6,89
Desv. Stnd.	1,30	0,25	1,87	16,33	16,28	0,037	0,15	1,21	5,05
Porcentaje	6,3	1,3	8,9	83,5	100,0	0,13		5,7	18,0

1/ Cada valor es el promedio de tres repeticiones, excepto Mg-total donde se hicieron dos.

de 32,06 meq/100 g; la distribución de acuerdo con el pH en NaF fué semejante a la del Mg-total y en promedio constituyó el 83,5 de él.

Magnesio soluble en ácido: este magnesio que se considera asociado a la parte coloidal del suelo (38) osciló entre 0,82 y 7,78 meq/100 g con un promedio de 3,40 meq/100 g. En promedio constituyó el 8,9% del magnesio total.

Esta fracción considerada como reserva por Metson y Gibson (37) es baja y no presenta valores promedios entre sí, al dividir los suelos de acuerdo con la cantidad de alófano en la fracción arcilla (pH en NaF). La correlación entre esta fracción y el magnesio reserva (Tabla 3) no fue significativa.

Magnesio intercambiable a pH 7 (en realidad magnesio intercambiable más el soluble en agua): la fracción magnesio intercambiable con promedio 2,41 meq/100 g presentó valores entre 1,03 y 5,19. No se presentaron valores diferentes en promedio cuando los suelos se dividieron de acuerdo con el pH en NaF. Estos valores variaron de medios a altos según varios autores (12) (30) (37). El Mg-intercambiable en promedio constituyó el 6,3% del magnesio total.

Magnesio unido a la materia orgánica: su valor fue bajo, de 0,51 meq/100 g en promedio, variando entre 0,18 y 1,08 meq/100 g; no presentó correlación significativa con el porcentaje de C-orgánico del suelo, indicando que probablemente no existen los compuestos Mg-materia orgánica como una forma estable.

Magnesio reserva: su valor promedio de 6,89 meq/100 g está por encima del obtenido

Tabla 3. Coeficientes de correlación lineal entre algunas fracciones de magnesio en el suelo.

	Todos los Suelos	Suelos con pH NaF $\geq$ 9,5	Suelos con pH NaF $<$ 9,5
<b>Mg-total vs .</b>			
Mg-soluble en ácido	0,0393	-0,7760*	0,2940
Mg-minerales primarios	0,9884**	0,9936**	0,9642**
Mg-intercambiable	0,0472	-0,6151	0,5938
Mg-reserva	0,7139**	0,6311	-0,2686
<b>Mg-soluble en ácido vs.</b>			
Mg-intercambiable	0,1185	0,4272	-0,1089
Mg-reserva	0,0321	-0,3660	0,2237
<b>Mg-intercambiable vs.</b>			
Mg-minerales primarios	-0,0508	-0,6873*	0,5661
Mg-soluble en agua	0,3288	0,1036	0,5939

\*: Significativo al nivel del 5%

\*\* : Significativo al nivel del 1%

para el Mg-soluble en ácido. Al igual que otras fracciones del suelo, el pH en NaF lo dividió en grupos con valores promedios diferentes así: Para los suelos con pH en NaF mayor o igual a 9,5 el valor promedio fue de 10,71 y para los restantes de 3,77 meq/100 g. Los valores de Mg-total y Mg-reserva presentaron una asociación significativa y positiva al considerar los 20 suelos o los suelos con pH en NaF mayor o igual a 9,5, para los suelos con pH menor de 9,5 el coeficiente de correlación no fue significativo (Tabla 3). La situación anterior debe estar relacionada con la menor estabilidad de los minerales en los suelos más jóvenes.

Magnesio soluble en agua: fue la fracción más pequeña, como se esperaba. Del magnesio total constituyó el 0,13% y del magnesio intercambiable un 2%, su valor promedio fue de 0,048 meq/100 g y osciló entre 0,010 y 0,178 meq/100 g. No presentó correlación significativa con las otras fracciones del suelo.

Magnesio no intercambiable disponible (la diferencia entre el intercambiable a pH 7 por el método rápido y el intercambiable a pH 1): dado que el Mg-intercambiable a pH 1 resultó estadísticamente igual al intercambiable a pH 7, el valor de esta fracción no fue diferente de cero. Este resultado no es sorprendente ya que la metodología había sido diseñada para suelos arenosos con baja capacidad amortiguadora (29) (47) y ésta no es la situación de los suelos considerados en este estudio.

En general, aunque los suelos con pH en NaF mayor o igual a 9,5 presentaron contenido más alto de magnesio total, esta situación no se reflejó en las formas consideradas más fácilmente aprovechables o sea la intercambiable y la soluble en ácido, pero sí en el

magnesio reserva.

El magnesio total más bajo en los suelos con pH en NaF menor que 9,5, llama la atención sobre el manejo de suelos en estas condiciones. En el presente estudio todos los suelos de la asociación Cabrera-Cogua (siete muestras) y Bojacá-Cogua-Techo (dos muestras) estuvieron en esta situación; o sea que bajo cultivo intensivo ellos deben tender a presentar deficiencias de magnesio más rápidamente que los de las otras asociaciones consideradas.

La distribución relativa del magnesio en el orden: Mg-minerales primarios > Mg-soluble en ácido > Mg-intercambiable > Mg-unido a la materia orgánica, está de acuerdo con la obtenida por Mokwunye y Melsted (38) para suelos de la zona templada y tropical. Una distribución semejante obtuvieron Chamorro (7), con suelos de la Sabana de Bogotá y el Valle del Cauca (Colombia), y Téllez (53) en su estudio con 40 suelos de la Sabana de Bogotá.

Al comparar los resultados obtenidos para las diferentes fracciones con los de Téllez (53), ya que ambos se realizaron en la misma zona, aunque la toma de muestras fue diferente, se puede deducir lo siguiente:

- a) El Mg-soluble en agua fue una fracción más pequeña, tanto en valor absoluto como en porcentaje.
- b) Los valores relativos (porcentaje de cada fracción con respecto al Mg-total) fueron semejantes para el Mg-minerales primarios y el Mg-soluble en ácido, pero más bajos en valor absoluto.

- c) Para el Mg-intercambiable y el Mg-unido a la materia orgánica, se obtuvieron valores absolutos semejantes pero porcentajes más altos, por ser menor en promedio, el Mg-total en los suelos.

Con respecto a las metodologías para determinar las diferentes fracciones se puede observar lo siguiente:

En el fraccionamiento total la destrucción de la materia orgánica fue muy demorada (en promedio más de 15 días) y una vez que la reacción con agua oxigenada terminaba, era imposible separar la solución del sólido si no se agregaba un electrolito. En trabajos posteriores, en suelos con alto contenido de C-orgánico, sería conveniente proponer un tipo de tratamiento más drástico para destruir la materia orgánica.

La extracción del Mg-soluble en agua presentó el problema de la separación del sólido, ni la centrifugación ni el filtrado por papel de poro pequeño, pudieron retirar completamente las partículas en suspensión.

#### 4.2 CAPACIDAD DE RESTITUCION DEL MAGNESIO INTERCAMBIABLE

Los valores del magnesio intercambiable restituído en los diferentes períodos de incubación aparecen en la Tabla 4. Cada valor es la suma del liberado desde el tiempo cero, ó sea cuando al suelo se le extrajo el Mg-intercambiable inicial y se puso a incubar. Se observa que los valores en cada período, tienden a ser iguales.

Tabla 4. Restitución del Magnesio intercambiable (Valor acumulado a los diferentes período de incubación)

Suelo	2 Semanas	4 Semanas	8 Semanas	16 Semanas
	meq/100 g <u>1/</u>			
1	0,62	1,31	2,81	4,28
2	0,77	1,29	2,81	4,39
3	0,79	1,47	3,15	4,86
4	0,66	1,33	2,53	3,78
5	0,51	1,14	2,54	4,29
6	0,60	1,01	2,25	3,44
7	0,60	1,19	2,43	3,76
8	0,57	0,99	2,33	3,64
9	0,74	1,08	2,56	3,93
10	0,60	0,92	2,37	3,55
11	0,76	1,19	2,50	4,16
12	0,70	0,84	2,14	3,94
13	0,57	0,84	2,37	3,86
14	0,79	1,17	3,02	5,13
15	0,94	1,28	2,86	4,76
16	0,87	1,12	3,01	4,96
17	0,87	1,10	2,58	4,46
18	0,83	0,97	2,50	3,86
19	0,94	1,17	2,45	4,12
20	0,84	1,08	2,92	4,64

1/ Cada valor es el promedio de 3 replicaciones.

El promedio de Mg-liberado a intercambiable después de 16 semanas de incubación se encontró para los suelos con pH en NaF mayor o igual a 9,5, igual a 4,64 meq/100 g y para los con pH menor de 9,5 a 3,86 meq/100 g, siendo el promedio en el primer grupo mayor para un nivel de significación del 1%; esto puede apreciarse en la Figura 1 al igual que el comportamiento promedio de los dos grupos de suelos.

El coeficiente de correlación lineal entre el Mg-restituído y el tiempo de incubación para los suelos con mayor contenido de materiales amorfos fue de 0,9778 y para los restantes de 0,9786; ambos significativos al nivel del 1%.

Esta tendencia a una tasa constante de liberación (0,2754 meq/100 g x semana y 0,2328 meq/100 g x semana respectivamente) está de acuerdo con los resultados obtenidos, en condiciones semejantes, por Mokwunye y Melsted (39) en suelos de origen templado y tropical, aunque la tasa obtenida por ellos fue mucho menor (más o menos 0,11 meq/100 g x 30 días).

La alta capacidad de restitución del Mg-intercambiable en estos suelos, en condiciones óptimas de temperatura y humedad, es un índice de la gran capacidad que ellos tienen de reponer en condiciones naturales esa fracción en un tiempo mediano.

En este trabajo no se encontró correlación significativa entre el Mg-intercambiable y el restituído a las 16 semanas, pero si la hubo entre éste y el Mg-total o el Mg-minerales primarios ( $r$  0,6163 y 0,5976 respectivamente).

Al relacionar los resultados de la incubación con las fracciones de magnesio se observa

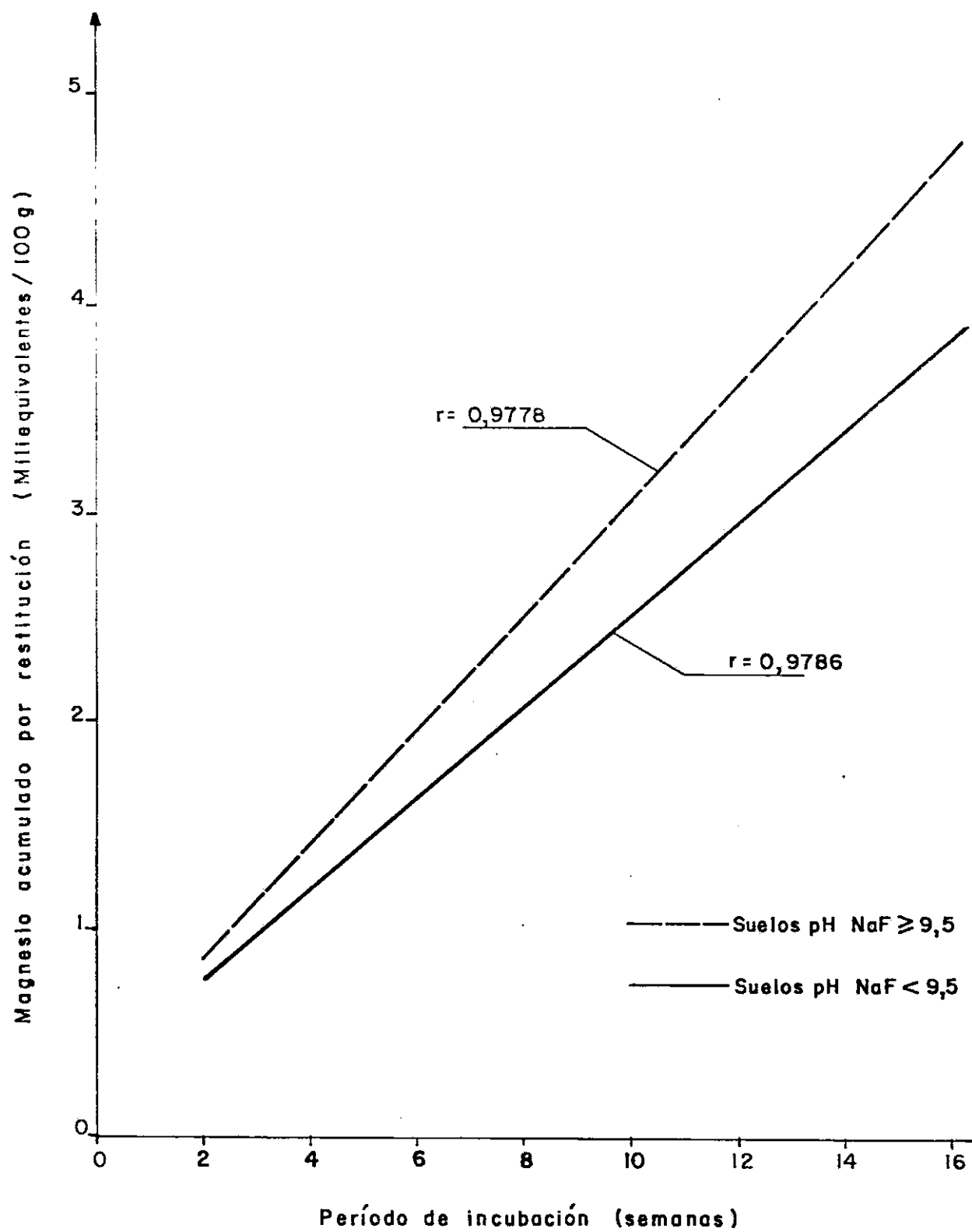


Figura 1: Líneas que representan la relación entre el magnesio restituído y los diferentes períodos de incubación.

que con el Mg-reserva la correlación fue positiva y altamente significativa para los 20 suelos (Tabla 5). Cuando éstos se dividieron de acuerdo con el pH en NaF la correlación significativa se mantuvo para los con pH mayor o igual a 9,5, no así para el otro grupo (ver Figura 2).

Por lo anterior se deduce que la metodología del Mg-reserva es prometedora para evaluar el magnesio que pasará a forma intercambiable, en los suelos estudiados, en un tiempo mediano.

Con la información puesta en relieve y observando la Tabla 5, puede pensarse que la fracción del suelo responsable de la reposición del Mg-intercambiable, es aquella asignada en el fraccionamiento a los minerales primarios y que la tasa de liberación es más alta cuando los suelos tienen influencia volcánica reciente.

Esto es lógico si se considera que en los suelos de la Sabana de Bogotá y alrededores, la fracción arcilla está formada especialmente por alofana, coolinita, haloisita, minerales que no tienen magnesio, pero que la fracción arena tiene abundantes minerales ferromagnesianos como hornblenda e hiperstena (36).

Que la influencia volcánica ha sido más reciente o que la meteorización de los suelos ha sido más fuerte, nos lo indica la presencia de gran cantidad de alofana en la fracción arcilla, pues este mineral amorfo es el antecesor de la haloisita y la coolinita en suelos derivados de ceniza volcánica (57).

Dado que los minerales ferromagnesianos son relativamente poco estables, no es sor-

Tabla 5. Coeficientes de correlación lineal entre el magnesio restituído en 16 semanas y las fracciones de magnesio en el suelo.

Fracción	Magnesio restituído		
	Todos los suelos	Suelos con pH NaF 9,5	Suelos con pH NaF 9,5
Mg-Total	0,6163**	0,3349	-0,3362
Mg-Unido materia orgánica	0,1978	0,2690	0,0175
Mg-Soluble en ácido	0,0602	0,0155	-0,1184
Mg-Intercambiable	0,0690	-0,0137	-0,1657
Mg-Minerales primarios	0,5976**	0,2845	-0,3311
Mg-Inter . pH 7 (rápido)	0,0455	-0,1608	-0,0927
Mg-Intercambiable pH 1	0,0813	-0,1543	-0,0284
Mg-Reserva	0,7924**	0,8330**	-0,0854
Mg-Soluble en agua	-0,2085	-0,6688*	0,1674

\*: Nivel de significación 5%

\*\* : Nivel de significación 1%

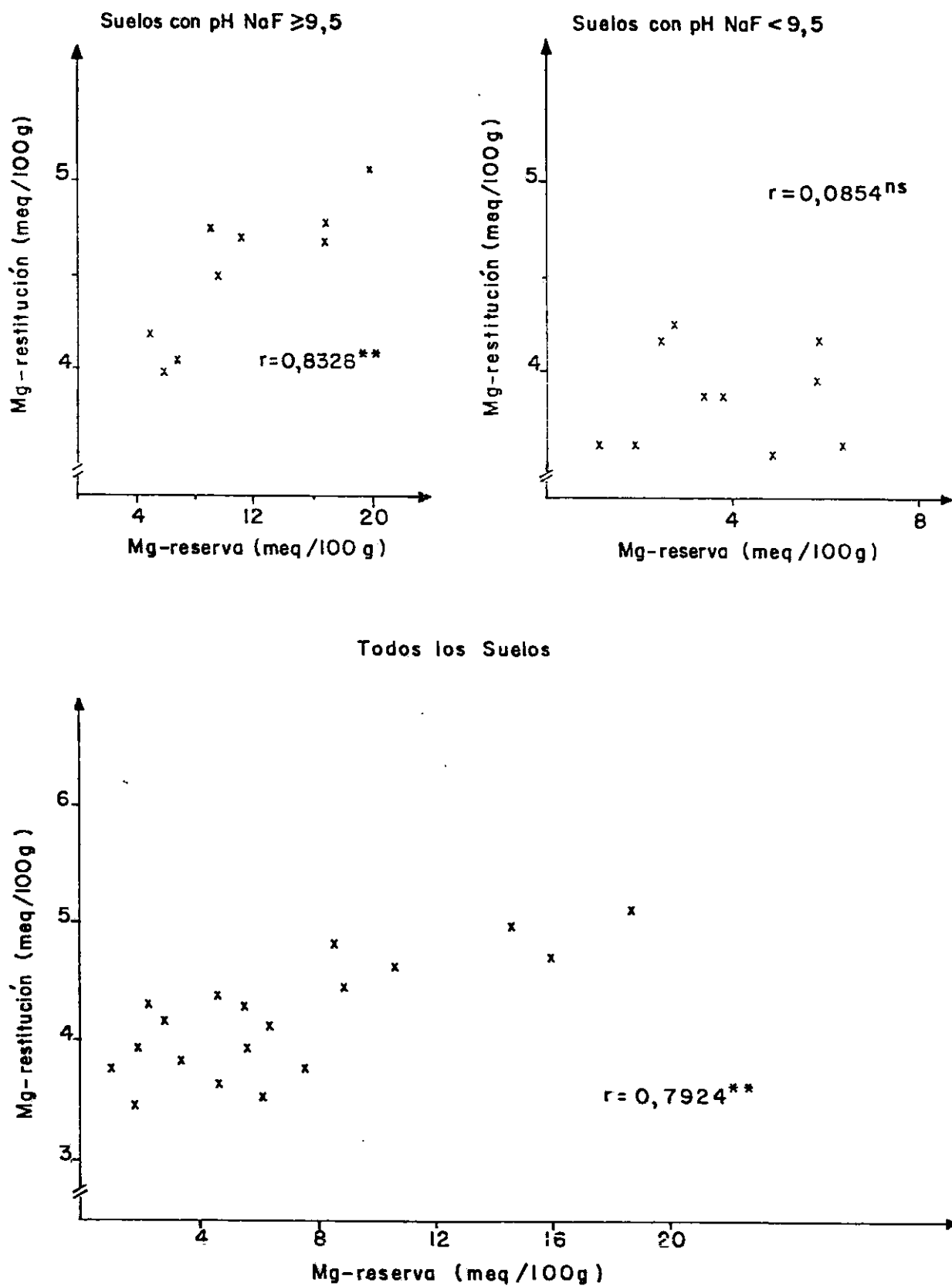


Figura 2: Relaciones entre el magnesio reserva y el Mg restituido después de 16 semanas de incubación.

pendiente que los suelos menos meteorizados sean los más ricos en ellos y por lo tanto exhiban un mayor potencial para reabastecer la fracción cambiante del magnesio.

Desde el punto de vista agronómico, la alta capacidad de restitución del magnesio intercambiable en los suelos estudiados debería conducir a no obtener respuesta a la fertilización con magnesio o a que el magnesio intercambiable inicial sea reemplazado rápidamente pero también llevaría a los suelos a perder con facilidad su magnesio de reserva.

#### 4.3 RESPUESTA DE LAS PLANTAS A LA ADICION DE MAGNESIO

Los resultados del ensayo en materas y la respuesta de las plantas a la adición de magnesio, puede resumirse:

##### 4.3.1 Rendimiento en peso seco

En la Tabla 6 se presentan los rendimientos en peso seco de ryegrass para los tres cortes, en suelos con y sin adición de magnesio, y el rendimiento relativo. El rendimiento en peso seco para cada corte aparece en la Tabla I del Apéndice.

El rendimiento en peso seco fue bajo a pesar de los tres cortes y el largo tiempo del ensayo (6 meses). No se presentó respuesta a la aplicación de magnesio al comparar los valores de materia seca obtenidos en cada corte, ni tampoco cuando se consideró el peso de los tres cortes. Tomando el peso de los tres cortes, solo

Tabla 6. Rendimiento de la cosecha (en base seca). Total de 3 cortes

Suelo	Sin adición de Mg _____ gramos /	Con adición de Mg _____ 1/ _____ materia	Rendimiento Re- lativo (%)
1	2,64	3,14	84,4
2	5,83	5,09	114,5
3	3,76	4,08	91,7
4	1,86	1,93	96,4
5	2,30	2,69	85,5*
6	2,68	3,33	80,7*
7	5,68	5,24	108,6
8	3,76	4,04	92,8
9	3,41	3,36	101,8
10	2,24	2,17	103,2
11	3,64	3,68	98,6
12	4,08	3,89	104,9
13	2,90	2,91	99,3
14	0,71	1,61	44,1*
15	3,12	3,05	102,0
16	0,86	1,04	83,0
17	3,78	3,82	99,2
18	2,95	3,44	85,5
19	4,23	4,18	101,2
20	1,91	2,42	79,6

1/ Cada valor es el promedio de 3 replicaciones.

\* : El aumento por la adición de Mg fue significativo a un nivel del 5%

se encontró respuesta a la aplicación de magnesio en los suelos 5, 6, 14 (diferencia significativa al nivel del 5%) y 18 (diferencia significativa al nivel del 10%). La falta de respuesta en rendimiento parece indicar que en general el suministro de magnesio en estos suelos fue adecuado para el rendimiento obtenido en las condiciones del ensayo.

#### 4.3.2 Absorción total de magnesio

La Tabla 7 recoge la absorción total de magnesio en los suelos, fertilizados y sin fertilizar con magnesio, y la absorción relativa de magnesio. De esta Tabla puede deducirse que de los 20 suelos estudiados, 15 (el 75%) respondieron a la adición de magnesio, cuando se midió el Mg-total absorbido por la planta de cada 1000 gramos de suelo. De los cinco suelos que no respondieron (suelos 2, 3, 7, 9, y 18), cuatro estaban por encima del 80% de absorción relativa (suelos 2, 7, 9 y 18). Esta situación se explica por el cambio en factores que controlan la disponibilidad del mangesio, que se consideraran posteriormente.

#### 4.3.3 Concentración de magnesio en la planta

Los resultados de la concentración de magnesio en la planta para cada uno de los tres cortes y en los suelos con y sin adición de magnesio se encuentran en la Tabla 8.

Analizando las concentraciones del primer corte se puede concluir que la concentración de magnesio en la planta, en las materas fertilizadas con dicho elemento, fue mayor (nivel de significación 5%) en 19 de los 20 suelos. En las plantas del suelo 18 no se

Tabla 7. Magnesio absorbido por la cosecha total.

Suelo	Sin adición de Mg	Con adición de Mg	Absorción Relativa (%)
	----- mg/Kg suelo	1/-----	
1	12,4	17,6	70,6**
2	35,0	34,7	100,8
3	10,1	15,7	64,4
4	10,3	13,1	79,4*
5	12,0	20,9	57,3**
6	14,1	24,5	57,6**
7	43,3	47,0	93,1
8	23,0	30,1	76,0*
9	19,5	22,6	86,1
10	7,3	15,3	47,8**
11	16,1	27,3	58,3*
12	21,5	28,1	76,4*
13	7,7	14,9	51,8**
14	2,1	8,4	25,0*
15	17,3	21,3	81,4*
16	1,8	4,9	36,7*
17	16,2	24,1	67,3**
18	17,3	19,6	88,3
19	19,3	28,2	68,2**
20	5,5	11,5	47,8**

1/ Cada valor es el promedio de 3 replicaciones.

\*: La adición de Mg aumentó la absorción, para un nivel de significancia del 5%.

\*\* : La adición de Mg aumentó la absorción, para un nivel de significancia del 1%.

Tabla 8. Concentración de magnesio en el tejido vegetal, en los suelos fertilizados o no con magnesio.

Suelo	1 <sup>o</sup> corte		2 <sup>o</sup> corte		3 <sup>o</sup> corte	
	Sin Mg	Con Mg	Sin Mg	Con Mg	Sin Mg	Con Mg
	-----		Porcentaje 1/		-----	
1	0,37	0,51	0,42	0,47	0,32	0,35
2	0,44	0,55	0,44	0,53	0,42	0,43
3	0,25	0,38	0,24	0,38	0,19	0,25
4	0,44	0,58	0,44	0,53	0,42	0,44
5	0,44	0,67	0,50	0,59	0,33	0,52
6	0,44	0,58	0,49	0,63	0,32	0,45
7	0,50	0,65	0,63	0,82	0,65	0,66
8	0,51	0,69	0,53	0,64	0,40	0,45
9	0,42	0,54	0,46	0,58	0,38	0,41
10	0,26	0,60	0,26	0,56	0,22	0,43
11	0,38	0,56	0,41	0,64	0,26	0,50
12	0,38	0,54	0,43	0,55	0,32	0,42
13	0,21	0,50	0,25	0,42	0,16	0,28
14	0,27	0,52	0,18	0,32	0,12	0,21
15	0,38	0,53	0,51	0,52	0,33	0,43
16	0,15	0,46	0,14	0,29	0,11	0,20
17	0,22	0,43	0,36	0,48	0,28	0,38
18	0,46	0,47	0,48	0,46	0,41	0,38
19	0,27	0,49	0,40	0,57	0,29	0,39
20	0,19	0,35	0,20	0,34	0,23	0,39

1/ Cada valor es el promedio de 3 replicaciones.

Los valores unidos con una línea son iguales entre sí para un nivel de significancia del 5%.

presentó aumento de la concentración de magnesio.

Al tomar la concentración de magnesio en las plantas del tercer corte como una medida del efecto del fertilizante puede decirse que este había desaparecido, después de 6 meses, en diez (suelos 1, 2, 3, 4, 6, 7, 8, 9, 14, 18) de los 20 suelos. También en este corte, se podía observar que las plantas de los suelos 3, 13, 14 y 16 sin fertilizar, presentaban un porcentaje de magnesio menor de 0,20, concentración mínima necesaria para una adecuada nutrición animal (2) (23) (34) y en los suelos 14 y 16 la concentración estaba en el límite (0,12%) bajo el cual se considera que hay respuesta, en rendimiento, a la adición de magnesio (2).

#### 4.4 FRACCIONES DE MAGNESIO EN RELACION CON LA PLANTA

##### 4.4.1 Rendimiento relativo

Las fracciones de magnesio en el suelo estuvieron pobremente correlacionadas con el rendimiento relativo (Tabla 9).

El Mg-unido a la materia orgánica presentó un coeficiente de correlación lineal ( $r=0,4135$ ) significativo al nivel del 10%.

El Mg-reserva y el de restitución presentaron correlación negativa significativa (al 5 y 10% respectivamente) con el rendimiento relativo. La correlación negativa puede indicarnos que ambas metodologías son muy drásticas para evaluar el magnesio inmediatamente disponible para las plantas, en condiciones naturales. Estas metodologías presentan

Tabla 9. Coeficientes de correlación lineal entre las variables de respuesta y las fracciones de magnesio ó algunas otras características del suelo.

	Rendimiento		Relativo		pHNaF > 9,5		pHNaF < 9,5		Absorción total de Mg		pHNaF > 9,5		pHNaF < 9,5		Absorción relativa de Mg		pHNaF > 9,5		pHNaF < 9,5		Concentración Mg en primer corte		
	20 suelos		pHNaF > 9,5	pHNaF < 9,5	20 suelos		pHNaF > 9,5	pHNaF < 9,5	20 suelos		pHNaF > 9,5	pHNaF < 9,5	20 suelos		pHNaF > 9,5	pHNaF < 9,5	20 suelos		pHNaF > 9,5	pHNaF < 9,5	20 suelos		
Mg-total	-0,2772		-0,6044°	0,3361	-0,4421°		-0,8191**	0,6267*	-0,6292**		-0,8075**	0,7650**	-0,5320*		-0,8075**	0,7650**	-0,5320*		-0,8075**	0,7650**	-0,5320*		-0,7104*
Mg-minerales primarios	-0,3331		-0,6041°	0,2833	-0,2094		0,6223°	0,7191*	-0,3096		-0,8180**	0,8156**	-0,5346*		-0,8180**	0,8156**	-0,5346*		-0,8180**	0,8156**	-0,5346*		0,4474
Mg-soluble en ácido	0,2911		0,4085	0,3531	-0,0188		0,4272	-0,2200	0,0908		0,5520	-0,1700	-0,2731		0,5520	-0,1700	-0,2731		0,5520	-0,1700	-0,2731		-0,5847°
Mg-unido a materia orgánica	0,4135°		0,4571	0,4106	0,1450		0,3986	-0,1455	0,1291		0,4602	-0,4038	-0,1022		0,4602	-0,4038	-0,1022		0,4602	-0,4038	-0,1022		-0,4214
Mg-Intercambiable	0,2234		0,3842	-0,0992	0,4308°		0,6075°	0,2875	0,6365**		0,6363°	0,7604**	0,4878*		0,6363°	0,7604**	0,4878*		0,6363°	0,7604**	0,4878*		0,5373°
Mg-inter. (rápido pH:7)	0,2886		0,4642	-0,2146	0,5071*		0,7388*	0,2758	0,6611**		0,7060*	0,7619**	0,5067*		0,7060*	0,7619**	0,5067*		0,7060*	0,7619**	0,5067*		0,5830°
Mg-Intercambiable (pH:1)	0,1987		0,4730	-0,2150	0,4755*		0,7180*	0,2446	0,6690**		0,7147*	0,7704**	0,5151*		0,7147*	0,7704**	0,5151*		0,7147*	0,7704**	0,5151*		0,5704°
Mg-reserva	-0,5156*		-0,7555*	-0,0409	-0,5152*		-0,7230*	-0,5199	-0,4896*		-0,6865*	-0,1200	-0,3372		-0,6865*	-0,1200	-0,3372		-0,6865*	-0,1200	-0,3372		-0,2301
Mg-restitución	-0,4425*		-0,7131*	-0,1716	-0,3728		-0,7045*	-0,1172	-0,3880°		-0,6379°	-0,0033	-0,4382		-0,6379°	-0,0033	-0,4382		-0,6379°	-0,0033	-0,4382		-0,0419
Mg-soluble en agua	0,0774		0,4488	-0,2903	0,1832		0,2288	0,1149	0,4394°		0,3670	0,5381°	0,3460		0,3670	0,5381°	0,3460		0,3670	0,5381°	0,3460		0,2872
% saturación (CCC pH:7)	0,1799		0,5562°	-0,3091	0,4164°		0,8264**	0,2330	0,5615**		0,7794*	0,5106	0,8588**		0,7794*	0,5106	0,8588**		0,7794*	0,5106	0,8588**		0,7542**
% saturación (CCC efectiva)	0,1803		0,3243	-0,1633	0,4566*		0,5777	0,3132	0,3540		0,4840	0,4689	0,6484**		0,4840	0,4689	0,6484**		0,4840	0,4689	0,6484**		0,6349*
Relación Ca/Mg	-0,2146		-0,2017	-0,1981	-0,2235		-0,3790	0,0294	-0,1009		-0,3104	0,4101	-0,2897		-0,3104	0,4101	-0,2897		-0,3104	0,4101	-0,2897		0,1033
Relación Mg/K eg 1/	0,1083		0,1732	0,0527	0,0924		-0,0651	0,0662	0,3926°		-0,0183	0,6187*	0,5278*		-0,0183	0,6187*	0,5278*		-0,0183	0,6187*	0,5278*		0,4617
Relación Mg/K	0,0944		0,1309	0,0888	-0,0237		-0,1273	-0,1014	0,2783		-0,0837	0,3940	0,3956°		-0,0837	0,3940	0,3956°		-0,0837	0,3940	0,3956°		0,2916
Relación Mg/K+Mg+Ca	0,1135		-0,1188	0,3155	-0,0082		-0,1895	-0,0397	-0,1099		-0,1382	-0,8531**	0,2663		-0,1382	-0,8531**	0,2663		-0,1382	-0,8531**	0,2663		0,1339
Relación K eg/Ca+Mg	-0,1457		-0,1423	0,0737	-0,0372		0,2670	-0,3416	-0,2375		0,0899	-0,4417°	-0,4417°		0,0899	-0,4417°	-0,4417°		0,0899	-0,4417°	-0,4417°		0,1885
pH: agua	-0,1832		0,0651	-0,4892	0,0686		0,5376	0,2240	0,3072		0,3763	0,3744	0,7102*		0,3763	0,3744	0,7102*		0,3763	0,3744	0,7102*		0,2879
Carbón orgánico	-0,2857		-0,7548*	0,6084*	-0,2426		-0,6840*	0,2240	-0,3577		-0,7414*	0,0794	-0,5811**		-0,7414*	0,0794	-0,5811**		-0,7414*	0,0794	-0,5811**		-0,3612
% arcilla	0,2369		0,4318	0,0924	-0,1630		0,3881	-0,2786	0,1003		0,4821	-0,2987	0,5008		0,4821	-0,2987	0,5008		0,4821	-0,2987	0,5008		-0,6409*
% arcilla + limo	-0,0254		-0,0712	0,0603	-0,0364		-0,0592	0,0333	-0,1440		-0,1244	-0,1090	0,0357		-0,1244	-0,1090	0,0357		-0,1244	-0,1090	0,0357		-0,3872

1/ K eg: K inicial + el agregado como fertilizante.

°: Nivel de significancia 10%

\*: Nivel de significancia 5%

\*\* : Nivel de significancia 1%

correlación con la reserva total del suelo (Mg-total y Mg-minerales primarios) fracciones que también correlacionan negativamente (aunque no en forma significativa) con el rendimiento relativo.

El rendimiento relativo presentó un comportamiento peculiar que se puede observar en la Figura 3 con respecto al porcentaje de C-orgánico. No presentó correlación lineal significativa cuando se tuvieron en cuenta los 20 suelos, pero al dividirlos de acuerdo con el pH en NaF la correlación fué significativa y negativa ( $r=-0,7548$ ) para los con pH mayor o igual a 9,5; y significativa y positiva ( $r=0,6084$ ) para los con pH menor de 9,5.

Observando la distribución de los puntos en la Figura 3, cuando se consideran todos los suelos, puede verse la tendencia a distribuirse según una parábola con un máximo para un valor cercano a 10% de C-orgánico. El ajuste a una relación de tipo cuadrático lleva a tener un  $R^2$  de 0,6785, significativo al 1%. Que la respuesta a la fertilización con magnesio sea directamente proporcional al porcentaje de C-orgánico a partir de un valor de 10% aproximadamente, debe estar más relacionada con otras características que controlan la disponibilidad del magnesio (como el porcentaje de saturación) que con las diferentes fracciones del magnesio en el suelo.

El comportamiento diferente entre los dos grupos de suelos también podría estar relacionado con el hecho de que los suelos con alto contenido de alofana acumulan materia orgánica, pero también presentan fenómenos que disminuyen la fertilidad, como una baja disponibilidad de fosfatos y una lenta mineralización de materia orgánica, situaciones estas que pueden ser parcialmente compensadas por la fertilización con Mg (1) (52).

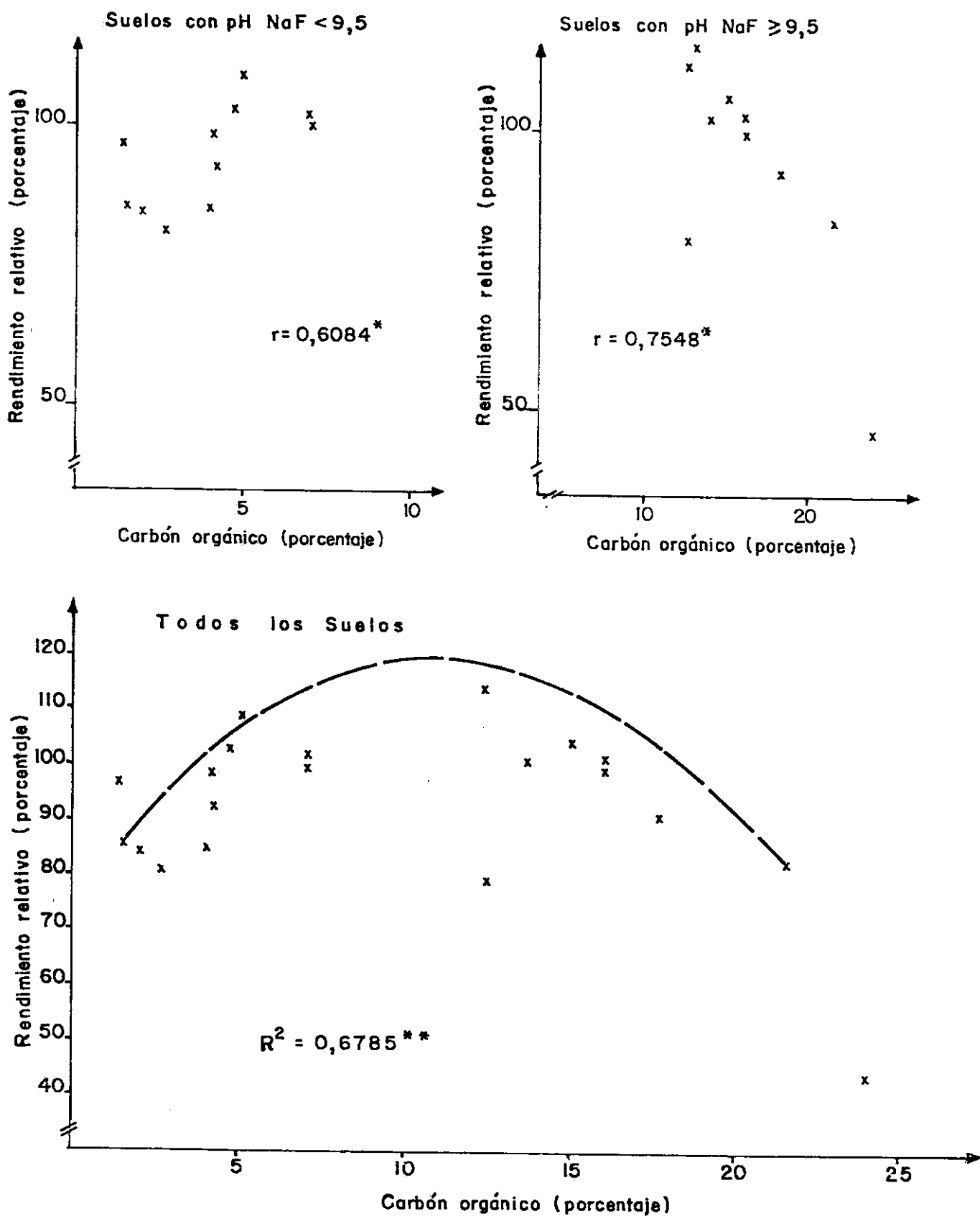


Figura 3: Rendimiento relativo del ryegrass vs. contenido de carbón orgánico en el suelo.

Se destaca el hecho de que en este trabajo se mostró el contenido de materia orgánica como la mejor variable para predecir la respuesta en rendimiento en base seca, a la fertilización con magnesio. A medida que se aleja de 10,3% en ambos sentidos, el valor del porcentaje de C-orgánico del suelo, la probabilidad de respuesta aumenta, pudiéndose considerar los valores cercanos a este porcentaje de C-orgánico los más adecuados para una óptima disponibilidad de magnesio, en los suelos de la región estudiada.

#### 4.4.2 Absorción total de magnesio

Al tener en cuenta todos los suelos se encontraron pocas correlaciones significativas, al nivel del 5%, entre el magnesio absorbido por las plantas y el de las diferentes fracciones del suelo. Esas fueron para Mg-intercambiable (rápido) a pH 7 y a pH 1 ( $r=0,5071$  y  $0,4755$  respectivamente). Para el Mg-intercambiable del fraccionamiento el coeficiente de correlación  $r=0,4308$  fue significativo al nivel del 10%.

Cuando los suelos se dividieron de acuerdo al pH en NaF la correlación significativa entre las fracciones intercambiables y la absorción total se mantuvo para los suelos con pH mayor o igual a 9,5, no así para los restantes.

El Mg-total presentó una correlación no significativa para el conjunto de suelos pero si altamente significativa negativa ( $r=-0,8191$ ) para los con pH en NaF mayor o igual a 9,5 y significativa y positiva ( $r=0,6267$ ) para el resto de ellos. Este resultado nos puede estar

mostrando la poca influencia inmediata del material parental sobre la disponibilidad del magnesio, ya que los suelos del primer grupo son mucho más ricos en Mg-total que los restantes pero las fracciones intercambiable y soluble en ácido son semejantes.

El Mg-reserva y el de restitución presentaron correlaciones negativas y significativas con el absorbido, indicando que sus valores altos no reflejan la disponibilidad inmediata para las plantas.

Teniendo en cuenta los coeficientes de correlación (Tabla 9) y el porcentaje de cada fracción (Tabla 2), puede decirse que el magnesio absorbido por las plantas provino en su gran mayoría de las formas intercambiables.

#### 4.4.3 Concentración de magnesio en el tejido vegetal del primer corte

Se tomó el valor del primer corte porque para los otros las condiciones del suelo podrían haber cambiado. Esta variable presentó la mayor cantidad de correlaciones significativas con las fracciones de magnesio del suelo y los coeficientes de correlación, en general, fueron los más altos (Tabla 9), presentó correlación positiva y significativa con: Mg-intercambiable tanto a pH 7, fraccionamiento y rápido, como a pH 1 ( $r=0,4878$ ;  $r=0,5067$  y  $r=0,5151$ ).

Las correlaciones con el magnesio en los minerales primarios y con los valores de restitución, fueron negativas y significativas.

Las fracciones de Mg-intercambiable fueron las responsables en mayor proporción, de

la concentración del magnesio en la planta. El coeficiente de correlación significativo y negativo entre la concentración de magnesio en la planta y el porcentaje de materia orgánica en el suelo parece confirmar lo dicho por Agboola y Corey (1) de la mayor estabilidad de las uniones Mg-materia orgánica con respecto a las K-materia orgánica, que disminuye la disponibilidad del primero.

#### 4.4.4 Mg-intercambiable antes y después de la cosecha y relación del magnesio absorbido por la planta con el Mg-intercambiable inicial

##### 4.4.4.1 Cambio del Mg-intercambiable

En la Tabla 10 se recoge la información con respecto al Mg-intercambiable antes y después de la cosecha, para los suelos fertilizados o no con magnesio.

Para los fertilizados, se tomó como el Mg-intercambiable inicial, la suma del Mg-intercambiable del suelo más el agregado como fertilizante, asumiendo que la fijación inmediata es mínima, por no haber cambio de pH.

Al hacer las diferencias se observa que en los fertilizados el  $\Delta$  Mg promedio fue de 1,25 meq/100 g y en los restantes 0,35 meq/100 g. Cuando el  $\Delta$  Mg se expresó como porcentaje de Mg-intercambiable inicial se encontró que era mayor para los suelos fertilizados (30%) que para los no fertilizados (14%).

Dado que las plantas absorbieron en promedio una pequeña cantidad, equivalente al 5,3%, del Mg-intercambiable inicial (ver Tabla 11), se puede concluir que el magne-

Tabla 10. Magnesio intercambiable antes y después de la cosecha, en suelos fertilizados y sin fertilizar con magnesio.

Suelo	Fertilizados con Mg			Sin fertilizar con Mg		
	Mg-antes	Mg-después	Mg meq/100 g	Mg-antes	Mg-después	Mg
	-----			1/	-----	
1	3,98	3,06	0,92	1,91	1,65	0,26
2	7,93	6,96	0,97	5,73	5,24	0,49
3	4,15	2,71	1,44	1,78	1,63	0,15
4	4,12	3,15	0,97	2,07	1,95	0,12
5	3,47	2,25	1,22	1,43	1,28	0,15
6	3,92	2,75	1,17	1,85	1,62	0,23
7	3,84	2,63	1,21	1,77	1,34	0,43
8	4,90	3,57	1,33	2,83	2,35	0,48
9	5,27	4,45	1,18	3,16	2,88	0,28
10	3,12	1,79	1,33	1,01	0,89	0,12
11	3,42	2,15	1,27	1,28	1,15	0,13
12	5,47	3,66	1,81	3,14	2,10	1,04
13	3,45	1,94	1,51	1,26	1,19	0,07
14	4,72	3,16	1,56	2,16	1,95	0,21
15	6,48	4,76	1,72	4,13	2,85	1,28
16	4,23	2,93	1,30	1,63	1,69	-0,06
17	3,95	2,50	1,45	1,51	1,20	0,31
18	5,60	4,86	0,74	3,48	3,12	0,36
19	3,53	2,49	1,04	1,23	1,00	0,23
20	2,96	2,04	0,92	0,74	0,80	-0,06
Promedio			1,25			0,35 <sup>2/</sup>

1/ Cada valor es el promedio de 3 replicaciones.

2/ No se tuvieron en cuenta los valores negativos.

Tabla 11. Magnesio absorbido por las plantas, expresado como porcentaje de Mg-intercambiable inicial del suelo.

Suelo	Con adición de Mg		Sin adición de Mg	
	Mg-int-in. meq/100 g	Absorbido %	Mg-int-in. meq/100 g	Absorbido %
1	3,98	3,7	1,91	5,4
2	7,93	3,6	5,73	5,1
3	4,15	3,2	1,78	4,7
4	4,12	2,7	2,07	4,1
5	3,47	5,0	1,43	7,0
6	3,92	5,2	1,85	6,3
7	3,84	10,2	1,77	20,4
8	4,90	5,1	2,83	6,8
9	5,27	3,6	3,16	5,1
10	3,12	4,1	1,01	6,1
11	3,42	6,6	1,28	10,5
12	5,47	4,3	3,14	5,7
13	3,45	3,5	1,26	5,1
14	4,72	1,5	2,16	0,8
15	6,48	2,7	4,13	3,5
16	4,23	1,0	1,63	0,9
17	3,95	5,2	1,51	8,9
18	5,60	2,9	3,48	4,1
19	3,53	6,7	1,23	13,1
20	2,96	3,2	0,74	6,2
Promedio		4,2		6,5

sio agregado como fertilizante dejó de ser intercambiable, ya fuese por lavado o fijación, en mayor proporción que el intercambiable inicial del suelo, en un período de 6 meses.

En el presente ensayo en materas las pérdidas por lavado pudieron presentarse en el período en que se tuvo el cultivo sin cubierta protectora.

#### 4.4.4.2 Relación entre el Mg-intercambiable inicial y el absorbido por la planta

La Tabla 11 recoge la información con respecto al Mg-intercambiable, antes de la cosecha, en los suelos fertilizados y sin fertilizar con magnesio, y la cantidad absorbida por las plantas, expresada como porcentaje de dicha fracción.

Se puede observar que las plantas absorbieron en promedio una cantidad equivalente al 4,20% del Mg-intercambiable inicial en los suelos fertilizados con magnesio; 6,48% en los no fertilizados y 5,34% en el conjunto de suelos.

Se puede concluir que una cantidad equivalente a una pequeña fracción del Mg-intercambiable inicial, aproximadamente un 5%, es absorbida por la parte aérea de las plantas ryegrass. Esto es importante de tener en cuenta cuando se fertiliza para aumentar la concentración de magnesio en la planta.

### 4.5. INDICES DE DISPONIBILIDAD Y NIVELES CRITICOS

#### 4.5.1 Índices de disponibilidad

Observando la Tabla 9, en la cual se encuentran los coeficientes de correla-

ción lineal entre las variables de respuesta y las fracciones del magnesio y algunas características del suelo, consideradas como índices para evaluar la disponibilidad del magnesio para las plantas (cuyos valores aparecen en las Tablas 4 y 5 del Apéndice), se puede concluir lo siguiente:

El Mg-unido a la materia orgánica, el Mg-unido a los minerales primarios, el Mg-soluble en ácido y el Mg-soluble en agua fueron muy deficientes para predecir, tanto el rendimiento relativo del cultivo, como la absorción o la concentración del magnesio en la planta.

El Mg-total, el Mg de restitución y el Mg-reserva, presentaron correlaciones negativas y significativas con las variables de respuesta.

La relación calcio a magnesio dentro de los límites considerados en este trabajo ( de 1,8 a 11,2) no presentó correlación significativa, pero en general los coeficientes de correlación tendieron a ser negativos, mostrando el antagonismo entre los cationes.

La relación potasio intercambiable inicial más el agregado como fertilizante, a calcio y magnesio intercambiables ( $K_{int+ag}/Ca+Mg$ ), (entre 0,03 y 0,46), estuvo poco asociada con las variables de respuesta, a excepción de la concentración de magnesio en la planta.

La relación Mg-intercambiable inicial a potasio intercambiable inicial o inicial más agregado como fertilizante ( $Mg/K_{in}$  ó  $Mg/K_{int+ag}$ ) solo presentó correlación significativa con el porcentaje de magnesio en la planta. Las relaciones  $Mg/K_{in}$ , variaron entre 0,47 y 24,4 y la  $Mg/K_{int+ag}$ , entre 0,4 y 6,2.

La relación magnesio intercambiable a calcio más potasio y más magnesio intercambiables ( $Mg_{in}/(Ca+Mg+K)_{in}$ ) propuesta por Turner y Neall (56) como un buen índice, no presentó correlación con las variables de respuesta.

Ni el pH (entre 5,15 y 7,05), ni el porcentaje de arcilla (entre 14,49 y 54,99) o de arcilla más limo (de 44,13 a 87%) fueron índices adecuados para predecir significativamente la disponibilidad del magnesio para las plantas.

Teniendo en cuenta los coeficientes de correlación lineal simple, se puede decir que los índices más eficientes para predecir la absorción (total o relativa) y la concentración de Mg en la planta, fueron: el Mg-intercambiable (tanto el del fraccionamiento como el obtenido por el método rápido a pH 7 ó a pH 1) y el porcentaje de saturación de magnesio, ya sea con respecto a la capacidad catiónica de cambio a pH 7 ó a la efectiva.

Esto está de acuerdo con Alston (2) quien dice que la disponibilidad del magnesio está afectada por la capacidad (Mg-intercambiable por ejemplo) y la intensidad (una de cuyas expresiones puede ser porcentaje de saturación) del elemento en el suelo.

Al buscar las ecuaciones de regresión según los modelos lineales múltiples, teniendo como variables independientes Mg-minerales primarios (X1), Mg-soluble en ácido (X2), Mg-intercambiable (X3), Mg-unido a la materia orgánica (X4), porcentaje de saturación de Mg con respecto a CCC pH 7 (X5), porcentaje de saturación de Mg con respecto a capacidad de cambio efectiva (X6), relación Ca/Mg (X7), relación Mg/K (X8) y dependientes: absorción total de Mg (Y1) y concentración de Mg en el tejido vegetal (Y2)

y hacer la eliminación combinada de variables según su importancia relativa, se encontró que en cada caso, solamente una de las variables independientes superó el límite de significación, 10%, necesario para entrar al modelo por lo cual no se pudo evaluar la importancia relativa por este sistema.

Se tomó luego como criterio la eliminación descendente de variables independientes. En este caso se incluyeron inicialmente todas las variables en el modelo y se fueron eliminando en pasos sucesivos, una cada vez, aquellas que no contribuían significativamente a explicar la variación de Y.

Para Y1 el orden de eliminación de las variables independientes fue X1, X4, X7, X2, X6, X8, X5 y X3 sin que ninguna fuera significativa al nivel del 5%. Para la variable dependiente Y2 el orden de eliminación de las independientes fue: X6, X8, X7, X2, X1, X4 y X3 quedando en el modelo X5 por ser la única significativa al nivel del 5%.

Para la absorción total de magnesio se encontró que las dos variables independientes más importantes eran en su orden el Mg-intercambiable y el porcentaje de saturación de magnesio (CCC pH 7). Cuando se incluyeron las dos variables en el modelo el coeficiente de determinación de 0,2579, sólo fue significativo al nivel del 8%. Este bajo valor de  $R^2$ , a pesar de que se incluyeron aquellas variables independientes que se consideraban responsables del control de la disponibilidad del magnesio para las plantas, llama la atención sobre la importancia de otros parámetros faltantes, entre los cuales debe figurar probablemente la velocidad de restitución

del Mg-soluble en agua y del Mg-intercambiable.

La ecuación que representaba el porcentaje de magnesio en el tejido vegetal, también llegó a seleccionar el Mg-intercambiable y el porcentaje de saturación (CCC pH:7) como las mejores variables independientes. El porcentaje de saturación fue la más importante (significativa al nivel del 0,01% y  $R^2=0,7388$ ). El Mg-intercambiable sólo fue significativo al nivel del 20%. La inclusión de las dos variables en el modelo llevó a tener un  $R^2=0,7639$ , significativo al nivel del 0,01%.

La situación anterior pone de presente el hecho admitido por varios autores (2) (13) (23) (31) (48) de que la concentración de magnesio, en el tejido vegetal, está más relacionada con la concentración relativa en el suelo que con las medidas de capacidad.

Esto es importante tenerlo presente cuando se necesita aumentar la concentración de magnesio en el tejido vegetal; Salmon (48) encontró trabajando con ryegrass, que para duplicar la concentración de magnesio en el pasto, debió aumentar cuatro veces el Mg-intercambiable y esto se cumplía para distintas concentraciones de calcio y potasio.

Para las variables independientes Mg-intercambiable (por el método rápido) y porcentaje de saturación con respecto a CCC pH 7 se calcularon los coeficientes de determinación de las ecuaciones cuadráticas que las relacionaban con las variables de respuesta. Se empleó el Mg-intercambiable por el método rápido por su facilidad de ejecución y su alta correlación con la fracción Mg-intercambiable del suelo ( $r=0,9621$ ). Del proceso anterior que aparece resumido en la Tabla 2 del Apéndice, se puede concluir

lo siguiente:

El rendimiento relativo no presentó relación significativa lineal, ni cuadrática, con las variables escogidas.

Para la absorción total de magnesio en mg/Kg de suelo, el  $R^2$  de 0,3352 fue significativo (nivel 5%) y no lo había sido el coeficiente de correlación lineal, cuando se usó porcentaje de saturación como variable independiente. Para la misma variable dependiente y Mg-intercambiable como independiente se obtuvo  $R^2 = 0,5628$ , siendo el aporte de la parte cuadrática altamente significativo (nivel 1%). Las Figuras 4 y 5 muestran la distribución de los puntos experimentales y las curvas correspondientes a las ecuaciones cuadráticas.

En la Figura 4 se puede observar que la absorción total de magnesio aumenta al hacerlo el porcentaje de saturación hasta un valor de 12% aproximadamente, punto éste en el cual empieza a producirse una disminución de la absorción, situación que puede estar relacionada con un desbalance entre los cationes del suelo.

La relación entre el Mg-absorbido y el Mg-intercambiable no presentó un punto de inflexión en el rango considerado, pero sí fue peculiar la parábola que describió (Figura 5). Dentro del rango considerado (0,74 a 5,73 meq/100 g) el Mg-absorbido aumentó al hacerlo el Mg-intercambiable del suelo.

Cuando la variable dependiente fue absorción relativa de magnesio, el aporte de las variables independientes al cuadrado, al  $R^2$ , fue altamente significativo (nivel 1%)

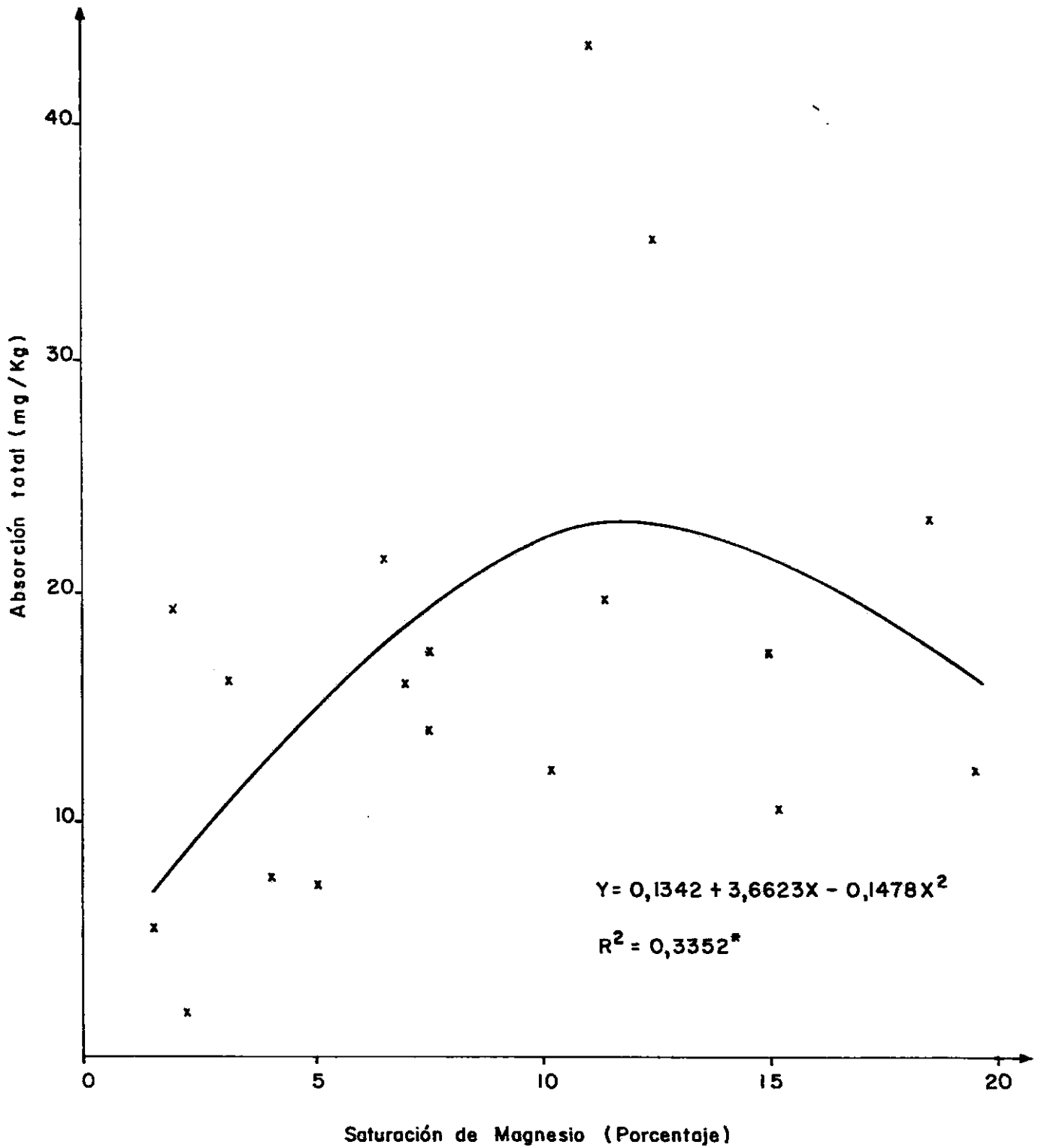


Figura 4: Absorción total de magnesio (mg extraídos/Kg suelo) en porcentaje de saturación de magnesio con respecto a la capacidad catiónica de cambio a pH 7.

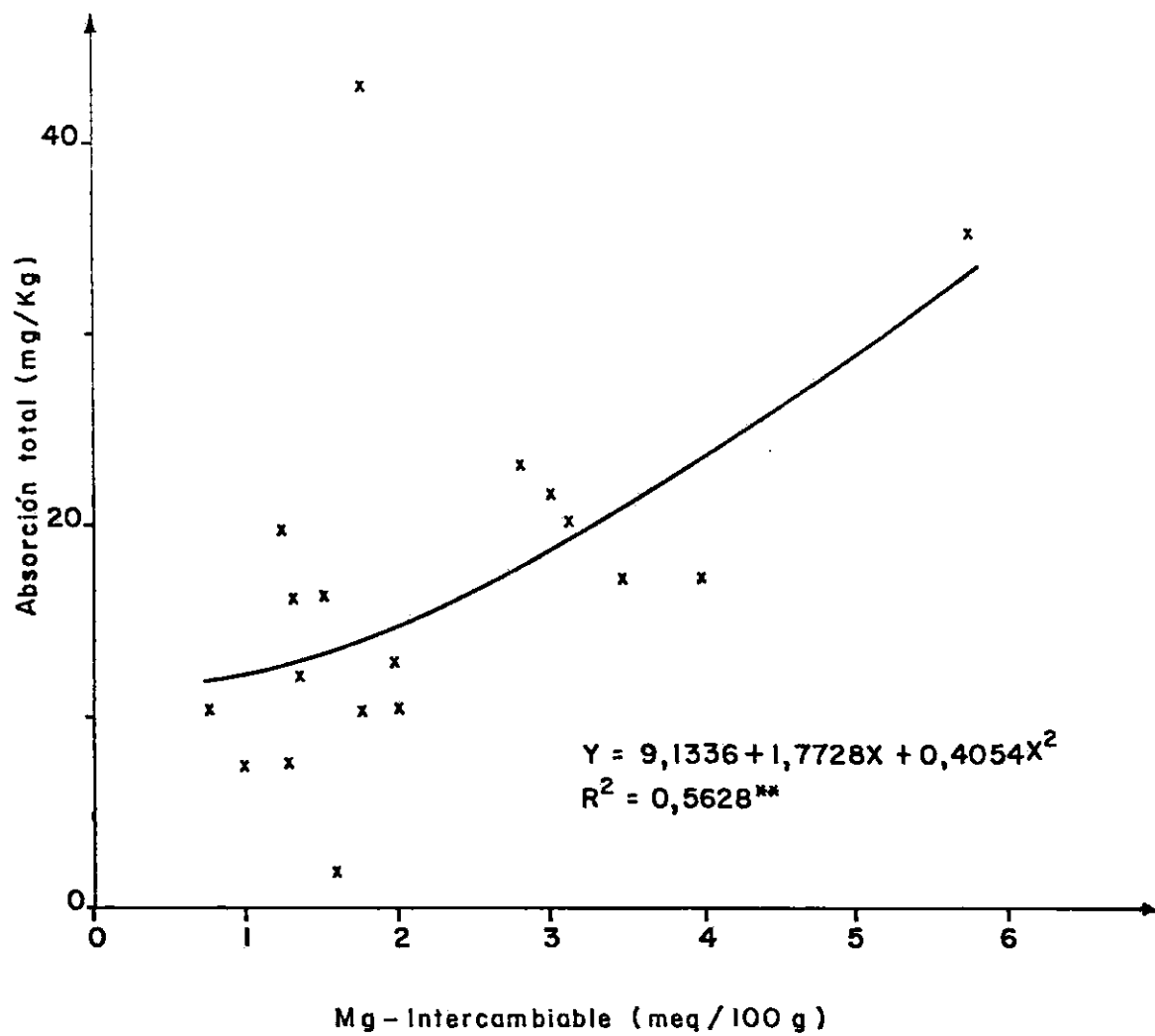


Figura 5: Absorción total de Mg (mg extraídos/Kg suelo) en función del Mg-Intercambiable del suelo.

obteniéndose valores de 0,7235 para el Mg-intercambiable y 0,5162 para el porcentaje de saturación.

La absorción relativa aumentó al hacerlo el Mg-intercambiable del suelo dentro del rango de este trabajo (Figura 6).

La Figura 7 muestra el aumento en el porcentaje de absorción relativa al hacerlo el porcentaje de saturación de magnesio, presentándose un máximo hacia 13% de saturación. Parece contradictorio observar que a partir de este punto exista una tendencia a mayor respuesta a la aplicación de magnesio. Esto se puede explicar porque los suelos que presentan los mayores valores de porcentaje de saturación (19,4 y 18,7%) tienen valores de Mg-intercambiable relativamente bajos (1,43 y 2,33 meq/100 g) y probablemente se debe a esto último la respuesta a la adición de magnesio.

Con respecto al porcentaje de magnesio en el tejido vegetal, no se encontró significativo el incremento de explicación por incluir, el Mg-intercambiable al cuadrado, en la ecuación de regresión; cuando se empleó el porcentaje de saturación se vió que el aporte de la parte cuadrática era altamente significativo y se obtuvo el mayor  $R^2$  del conjunto ( $R^2 = 0,8469$ ). Esto está reforzando lo afirmado anteriormente de que la concentración en la planta depende más de las relaciones con otros cationes que de la cantidad absoluta del elemento.

Las Figuras 8 y 9 recogen la información correspondiente a los puntos experimentales y a las ecuaciones cuadráticas. Para el porcentaje de magnesio en el tejido vegetal pue-

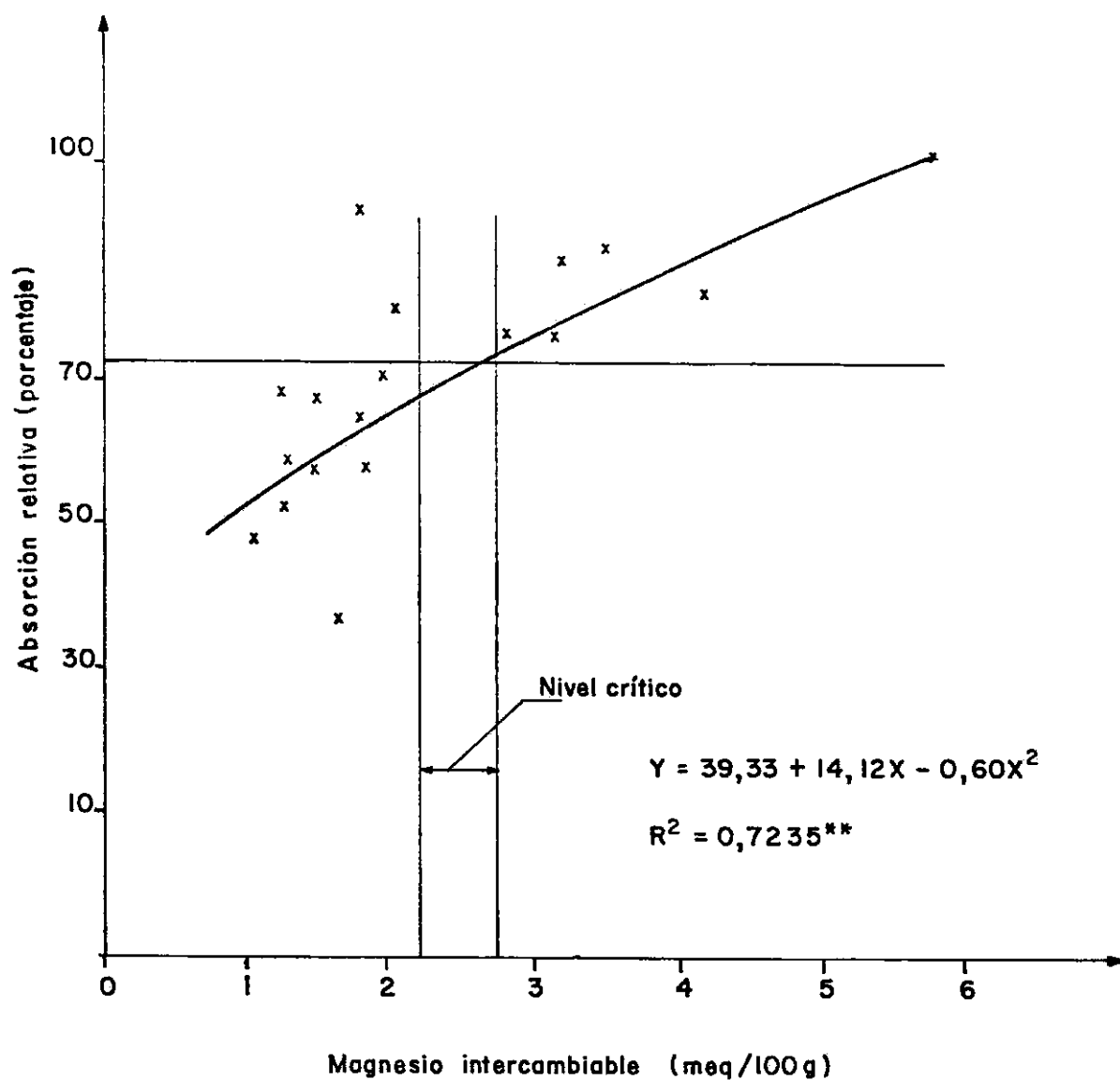


Figura 6: Absorción relativa de Mg por el tejido vegetal en función del Mg intercambiable del suelo.

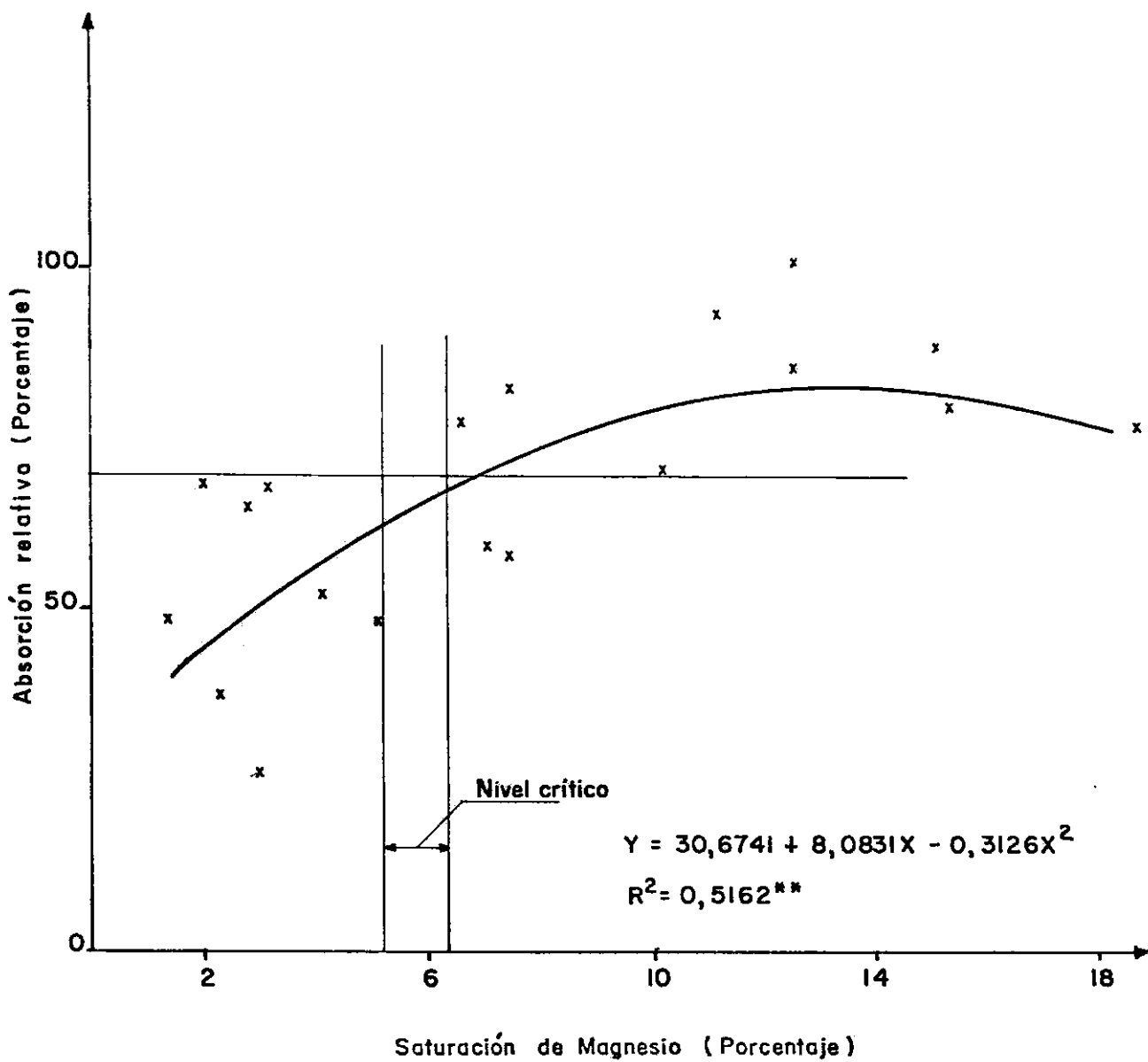


Figura 7 : Absorción relativa de Mg por el tejido vegetal en función del porcentaje de saturación de Mg con respecto a la capacidad catiónica de cambio a pH: 7

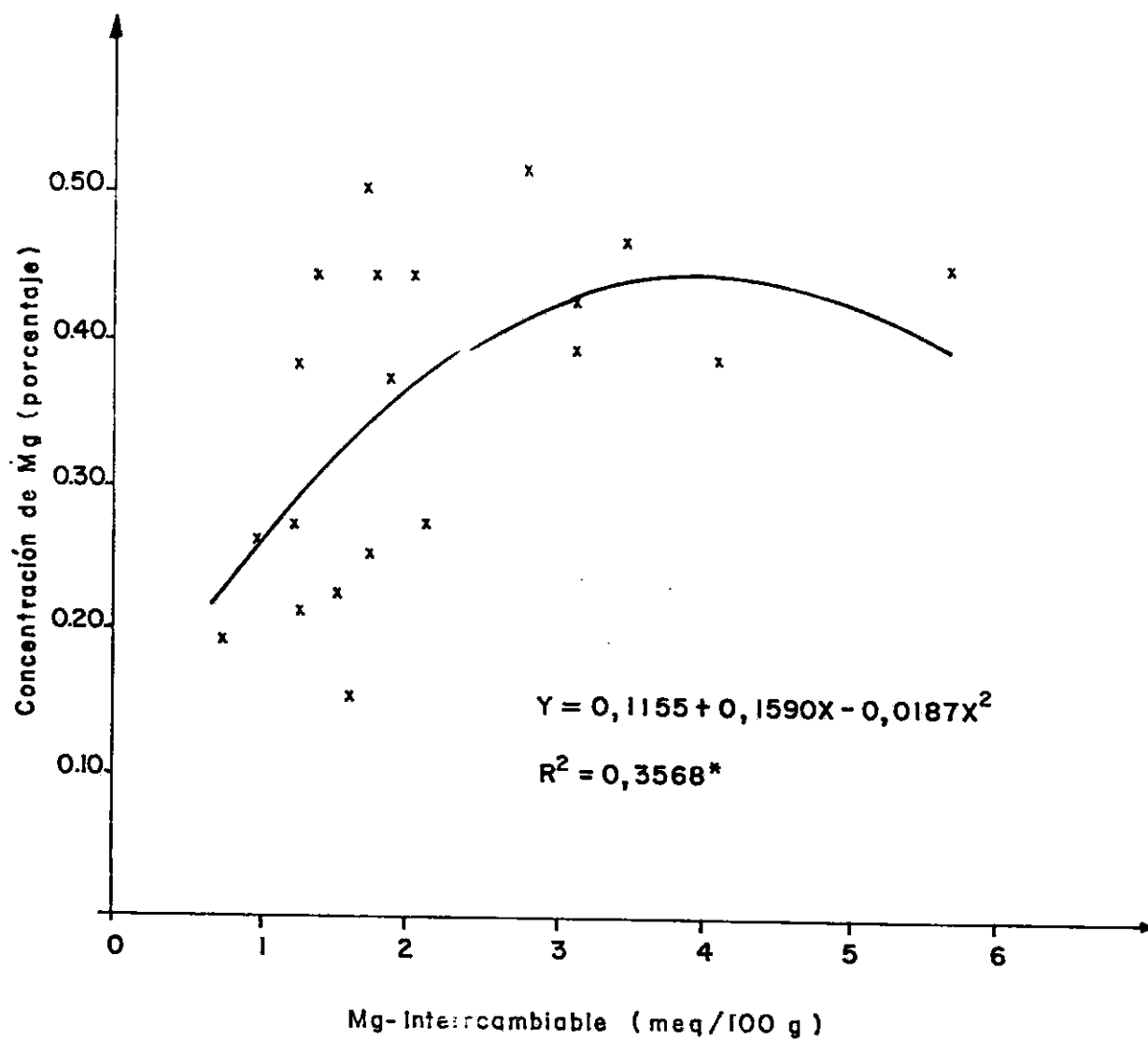


Figura 8: Concentración de Mg, en el tejido vegetal del primer corte, en función del Mg intercambiable del suelo.

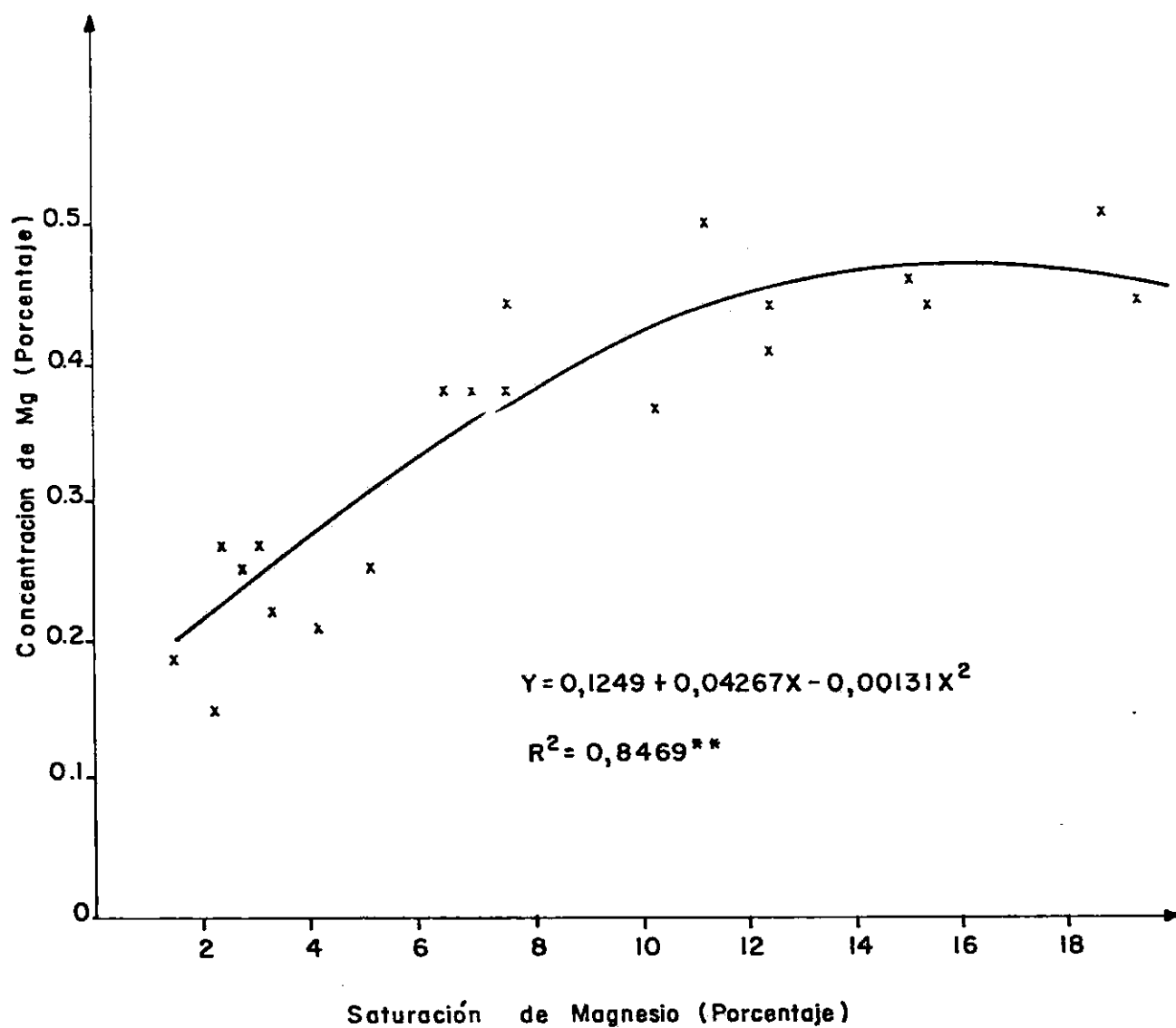


Figura 9 : Concentración de magnesio en el tejido vegetal del primer corte en función del porcentaje de saturación de Mg con respecto a la capacidad catiónica de cambio a pH: 7

de observarse que la ecuación presenta un máximo en 16,3% de porcentaje de saturación, valor a partir del cual el desbalance de cationes en el suelo, empieza a influir negativamente, en la concentración del magnesio en la planta.

Al comparar los coeficientes de determinación se pone de relieve que el Mg-intercambiable es un mejor índice para predecir el Mg-absorbido por la planta o la respuesta, en absorción total, a la fertilización con magnesio, que el porcentaje de saturación CCC pH:7; índice éste que fue más eficiente para predecir la concentración del elemento en la planta.

En general, se puede concluir que las variables más eficientes para predecir el Mg-absorbido por la planta y el porcentaje de Mg en ella fueron el Mg-intercambiable y el porcentaje de saturación (CCC pH:7) y que la combinación lineal de ellas no fue mejor para explicar esas variables dependientes que el polinomio de segundo grado con respecto al Mg-intercambiable o al porcentaje de saturación para la absorción de magnesio o el del porcentaje de saturación para la concentración del elemento en la planta.

#### 4.5.2 Cálculo de niveles críticos

Después del análisis anterior, se escogieron las variables de respuesta, absorción relativa y porcentaje de magnesio, para tratar de establecer un nivel crítico, a semejanza de los ideados por Cate y Nelson (5) para rendimiento relativo, de Mg-intercambiable y porcentaje de saturación de Mg.

En la Figura 6 puede observarse el nivel crítico del Mg-intercambiable con respecto al porcentaje de absorción relativa, determinado por el método gráfico. Este valor

está entre 2,16 y 2,83 meq/100 g de suelo. Para el proceso matemático, cuyos cálculos aparecen en la Tabla 3 del Apéndice, se deduce que el nivel crítico se encuentra también por encima de 2,16 y por debajo de 2,83 meq/100 g de suelo.

En la Figura 7, donde se presenta para el porcentaje de absorción relativa el nivel crítico del porcentaje de saturación de magnesio, puede observarse que éste se encuentra entre 5,13 y 6,48%, rango que coincide con el encontrado por el método matemático (Tabla 3 del Apéndice).

El nivel crítico del Mg-intercambiable es alto comparado con los que aparecen en la literatura para rendimiento (2) (26) (30) (50); con respecto al porcentaje de saturación de magnesio está en el rango recomendado por varios autores (26) (29).

Al seguir una metodología semejante para determinar un nivel crítico con respecto al porcentaje de magnesio en el tejido vegetal se encontró (Figura 9) el mismo rango que en el caso anterior, para el porcentaje de saturación, de 5,13 a 6,48%. Un nivel crítico en este caso tendría el sentido de dividir el incremento en la concentración de magnesio en la planta en alto y bajo, al aumentar el porcentaje de saturación en el suelo.

Es de anotar que los niveles críticos aquí determinados se refieren a la respuesta a la fertilización con magnesio, en aumento de absorción y concentración del elemento en la planta y no en rendimiento del tejido vegetal. Con respecto al nivel crítico para rendimiento podría pensarse que se trabajó en la mayoría de los casos, por encima de él.

## 5 - CONCLUSIONES

La distribución del magnesio en los suelos mostró el siguiente orden: Mg-minerales primarios > Mg-soluble en ácido > Mg-intercambiable > Mg-unido a materia orgánica > Mg-soluble en agua.

Los suelos con mayor contenido de alófana en su fracción arcilla fueron más ricos en Mg-total, situación que solo se reflejó en el Mg-minerales primarios y el Mg-reserva.

Los suelos en incubación presentaron alta capacidad de restitución del Mg-intercambiable y el Mg-reserva fue una buena medida de esta capacidad.

La metodología del fraccionamiento del magnesio presenta problemas para emplearla en suelos alofánicos.

Las plantas no respondieron a la adición de magnesio en aumento de materia seca, pero si en absorción del elemento y aumento de concentración.

La fracción Mg-intercambiable del suelo se mostró como la responsable del suministro inmediato del elemento a la planta.

Las fracciones de magnesio (excepto el Mg-intercambiable), las relaciones entre Mg, Ca y K, el pH en agua, y el porcentaje de arcilla o de arcilla más limo, no fue-

son eficientes para predecir la disponibilidad del magnesio como si lo fueran el Mg-intercambiable y el porcentaje de saturación de magnesio.

El contenido de materia orgánica se mostró como un buen índice para prever la respuesta, en rendimiento de las plantas, a la adición de magnesio. En la zona de 10% de C-orgánico la probabilidad de respuesta es mínima.

La concentración del magnesio en el tejido vegetal estuvo más relacionada con el porcentaje de saturación de Mg en el suelo y la absorción total del elemento por la planta con el Mg-intercambiable del suelo. Las relaciones más adecuadas fueron de tipo cuadrático. ( $R^2$  0,8469 y 0,5628 respectivamente).

Los niveles críticos en los suelos estudiados, para Mg-intercambiable y porcentaje de saturación de Mg (CCC pH:7) con respecto a la absorción relativa fueron 2,16 a 2,83 meq/100 g y 5,13 a 6,48% respectivamente.

El rango de 5,13 a 6,48% de saturación de magnesio en el suelo dividió el aumento en la concentración de magnesio en el tejido vegetal al hacerlo el porcentaje de saturación en alto y bajo.

En los suelos estudiados no se muestra una deficiencia de magnesio inmediata pero con cultivo intensivo ésta podría manifestarse, no tanto en rendimiento de materia seca, como en concentración del elemento en el forraje. Merecerían especial ciu-

dado los suelos con alto contenido de C-orgánico por la tendencia a presentar bajos porcentajes de saturación de magnesio.

## 6 - RESUMEN

Con el objeto de caracterizar las distintas fracciones de magnesio en el suelo, evaluar el aporte de cada una de ellas en el suministro del elemento a la planta, establecer la influencia de algunas características del suelo en la disponibilidad del magnesio, la confiabilidad de diferentes índices de disponibilidad y la capacidad de restitución del elemento en suelos de la zona andina de Cundinamarca, se hicieron ensayos de laboratorio, de incubación y en materas sembradas con Lolium híbrido, con 20 suelos de la zona.

Las fracciones de magnesio se distribuyeron en promedio así: Mg-minerales primarios (9,96 a 60,98) > Mg-soluble en ácido (0,82 a 7,78) > Mg-intercambiable (1,03 a 5,19) > Mg-unido a materia orgánica (0,18 a 1,08) > Mg-soluble en agua (0,010 a 0,178). El Mg-total (de 26,67 a 66,03 meq/100 g) fue mayor en suelos con alto contenido de material amorfo en su fracción arcilla.

El Mg-no intercambiable disponible (extraído a pH:1) resultó igual a cero. El Mg-reserva correlacionó significativamente con el liberado a las 16 semanas de incubación, tendiendo la tasa de liberación a ser constante y muy alta. Los coeficientes de correlación lineal entre estos valores y el Mg-absorbido por la planta fueron negativos y significativos. La fracción cambiante fue la más importante en el suministro inmediato de magnesio a la planta.

En el ensayo de materas en general no se presentó respuesta en rendimiento a la

adición de magnesio, pero si en absorción y concentración del magnesio en el tejido vegetal.

El pH, el porcentaje de arcilla o de arcilla más limo no mostraron influencia significativa sobre la disponibilidad del magnesio. Las relaciones entre los cationes intercambiables (Ca, Mg, K) en general no influyeron en la absorción del magnesio y mostraron más tendencia a hacerlo sobre la concentración del elemento en la planta. Los índices más adecuados para evaluar la disponibilidad fueron el Mg-intercambiable y el porcentaje de saturación de magnesio.

Para el porcentaje de absorción relativa, con una metodología semejante a la propuesta para el porcentaje de rendimiento relativo, se lograron establecer niveles críticos para el Mg-intercambiable y el porcentaje de saturación. En el primer caso estuvo entre 2,16 y 2,83 meq/100 g y para el porcentaje de saturación de magnesio con respecto a CCC a pH:7 entre 5,13 y 6,48%.

La concentración de magnesio en la parte aérea estuvo altamente relacionada con el porcentaje de saturación de magnesio en el suelo. La tendencia de la relación fue de tipo cuadrático, obteniéndose un coeficiente de determinación ( $R^2$ ) de 0,8469.

Para la respuesta en rendimiento, probablemente se trabajó por encima del nivel crítico, por lo cual no se pudo determinar.

## 7 - SUMMARY

In order to characterize the different fractions of magnesium in soils, to evaluate the contribution of each one to the element supply to the plant, to establish the influence of some soil characteristics to the magnesium availability, the accuracy of different availability parameters and the restitution capacity of this element in soils of the andian zone of Cundinamarca (Colombia), laboratory, incubation and pot tests were made with 20 soils of this zone.

The magnesium fractions were distributed as follows: Mg-primary mineral > Mg-acid-soluble > Mg-exchangeable > Mg-organic complexed > Mg-water soluble. The Mg-total was higher on soils with higher content of amorphous material in the clay fraction.

Mg-non-exchangeable available (extracted at pH 1) was equal to zero. The Mg-reserve significantly correlated with the one liberated after 16 weeks of incubation, and the tendency of the liberation rate was to be constant and high. The lineal correlation coefficients between these values and the Mg-absorbed by plant were negative and significant. The changeable fraction was the most important one in the immediate supply of magnesium to the plant.

In this work in pot test, there was no response in yield of Lolium hibridum to the magnesium adding, but there was response in absorption and concentration of Mg

in the vegetal tissue.

The pH, the percentage of clay or clay plus lime did not show any significant influence on the magnesium availability. The exchangeable cation ratios (Ca, Mg, K) in general, did not influence the magnesium absorption but they seem to influence the element concentration in the plant. The more accurate parameters to evaluate the magnesium availability were Mg-exchangeable and the percentage magnesium saturation.

For percentage of relative absorption, with a similar method to the one used for the percentage of relative yield, critical levels were established for Mg-exchangeable and for percentage magnesium saturation. In first case, level was between 2,16 and 2,83 meq/100 g and for the percentage of magnesium saturation in respect to CCC pH 7 between 5,13 and 6,48%.

The magnesium concentration in the aerial part of plant was highly related to the percentage of magnesium saturation in soil. The relation tendency was of the quadratic type, obtaining a determination coefficient ( $R^2$ ) of 0,8469.

For the yield response, perhaps we worked above the critical level, and for this reason it could not be determined.

## REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

1. AGBOOLA, A. A.; COREY, R. B. The relationship between soil pH, organic matter, available phosphorus, exchangeable potassium, calcium, magnesium, and nine elements in the maize tissue. *Soil Science (Estados Unidos)* v.115 no.5, p.367-375. 1973.
2. ALSTON, A. M. Availability of magnesium in soils. *Journal of Agricultural Science, (Inglaterra)* v.79 no.2, p.197-204. 1972.
3. ALLISON, L. E. Organic carbon. En: Black, C. A. *Methods of soil analysis; chemical and microbiological properties.* Madison, Wis., ASA, 1965. p.375 (Part 2, Agronomy no. 9).
4. BROERSMA, K.; RYSWYK, A. L. VAN. Magnesium deficiencies observed in forage corn varieties. *Canadian Journal of Plant Science* v.59 no.2, p.541-544. 1979.
5. CATE, R. B.; NELSON, L. A. A simple statistical procedure for partitioning Soil test correlation data into two classes. *Soil Science Society of America Proceeding (Estados Unidos)* v.35 no.4, p.658-660. 1971.
6. COOKE, G. W. *Fertilizing for maximum yield.* 2 ed. London, Granada, 1978. p.62, 154.

7. CHAMORRO, G. Fraccionamiento del magnesio en suelos del Valle del Cauca y Sabana de Bogotá. Bogotá, Universidad Jorge Tadeo Lozano, Facultad de Agrología, 1977. 66p. (Tesis Agrólogo).
8. CHRISTENSON, D.R.; DOLL, E. C. Release of magnesium from soil clay and silt fractions during cropping. Soil Science (Estados Unidos) v.116 no.1, p.59-63. 1973.
9. \_\_\_\_\_ ; \_\_\_\_\_. Magnesium uptake from exchangeable and non-exchangeable sources in soils as measured by intensive cropping. Soil Science (Estados Unidos) v.126 no.3, p.166-168. 1978.
10. \_\_\_\_\_ ; WHITE, R. P.; DOLL, E. C. Yields and magnesium uptake by plants as affected by soil pH and calcium levels. Agronomy Journal (Estados Unidos) v.65 no.2, p.205-206. 1973.
11. DOLL, E. C.; LUCAS, R. E. Testing soils for potassium, calcium and magnesium. En: Walsh, L. M. ed. Soil testing and plant analysis. Madison, Wis., SSSA, 1973. Capítulo 10. p.133-151.
12. DOMINGUEZ V., A. Abonos minerales. 5 ed. Madrid, Ministerio de Agricultura 1978. p.414.

13. EDMEADES, D. C.; JUDD, M. J. The effects of lime on the magnesium status and equilibria in some New Zealand topsoils. *Soil Science (Estados Unidos)* v.129 no.3, p.156-161. 1980.
14. FASSBENDER, H. W. *Química de suelos; con énfasis en suelos de América Latina*. Turrialba, Costa Rica, IICA AID, 1975. p.355-358.
15. FIELDS, M.; PERROTT, K. W. The nature of allophane in soils. Part 3 - Rapid field and laboratory test for allophane. *New Zealand Journal of Science* v.9 no.3, p.623-629. 1966.
16. GHEESLING, R. H.; PERKINS, H. F. Critical levels of manganese and magnesium in cotton at different stages of growth. *Agronomy Journal (Estados Unidos)* v.62 no.1, p.29-32. 1970.
17. GUERRERO M., R. *Suelos de Colombia y su relación con la séptima aproximación*. Bogotá, IGAC, 1965. 196p.
18. GUERRERO R., R. *Criterio para el diagnóstico químico de la fertilidad del suelo*. Bogotá, Universidad Nacional, Facultad de Agronomía, s.f. 25p. (Curso suelo planta, mimeografiado).
19. \_\_\_\_\_ ; BURBANO O., H. Fracciones de azufre y niveles críticos de disponibilidad para la planta en suelos de los Llanos Orientales y la Sabana de Bogotá. *Suelos Ecuatoriales (Colombia)* v.10 no.2, p.232-244. 1979.

20. INSTITUTO GEOGRAFICO AGUSTIN CODAZZI. BOGOTA (COLOMBIA).  
Mapa del estudio general de los suelos de la cuenca hidrográfrica alta del río Bogotá. Departamento de Cundinamarca. Bogotá, IGAC, 1968.  
Escala 1:100.000.
21. \_\_\_\_\_. Métodos analíticos del laboratorio de suelos. Bogotá, IGAC, 1973.  
172p.
22. \_\_\_\_\_. Aptitud de uso de los suelos de la Sabana de Bogotá y sus alrededores. Bogotá, IGAC, 1976. 26p.
23. KARLEN, D. L.; ELLIS, R.; WHITNEY, D. A.; GRUNES, D. L. Soil and plant parameters associated with grass tetany of cattle in Kansas. Agronomy Journal (Estados Unidos) v.72 no.1, p.61-65. 1980.
24. \_\_\_\_\_ ; \_\_\_\_\_ ; \_\_\_\_\_ ; GRUNES, D. L. Influence of soils moisture on soil solution cation concentrations and the tetany potential of wheat forage. Agronomy Journal (Estados Unidos) v.72 no.1, p.73-78. 1980.
25. LOMBIN, L. G. Evaluation of the magnesium supplying powers of the Nigerian Savannah soils. Soil Science and Plant Nutrition (Japón) v.25 no.4, p.477-492. 1979.

26. LOMBIN, L. G.; FAYEMI, A. A. A. Critical level of magnesium in Western Nigerian soils as estimated under greenhouse conditions. *Agronomy Journal* (Estados Unidos) v.67 no 2, p.272-275. 1975.
27. \_\_\_\_\_ ; \_\_\_\_\_. Evaluation of various soil tests for available magnesium in Western Nigeria. *Soil Science* (Estados Unidos) v.122 no.1, p.59-64. 1976.
28. \_\_\_\_\_ ; \_\_\_\_\_. Magnesium status and availability in soils of Western Nigeria. *Soil Science* (Estados Unidos) v.122 no.2, p.91-99. 1976.
29. \_\_\_\_\_ ; \_\_\_\_\_. Release of exchangeable and non-exchangeable magnesium from Nigerian soils on cropping with maize or chemical extraction. *Journal of the Science of Food and Agriculture* (Inglaterra) v.27 no.2, p.101-108. 1976.
30. LORA S., R. El análisis de suelos y su interpretación. En: Instituto Colombiano Agropecuario. El suelo y su fertilidad. Bogotá, ICA, 1978. p.261. (Compendio No. 23).
31. McLEAN, E. O.; CARBONELL, M. D. Calcium, magnesium and potassium saturation ratios in two soils and their effects upon yields and nutrient contents of german millet and alfalfa. *Soil Science of Society of America Proceedings* (Estados Unidos) v.36 no.6, p.927-930. 1972.

32. MANTILLA, G.; LEON, A. Estudios de suelos del Valle del Cauca con la relación calcio-magnesio invertida. I-Características de los suelos. Revista ICA (Colombia) v.6 no.1, p.41-51. 1971.
33. \_\_\_\_\_ ; \_\_\_\_\_. Estudios de suelos del Valle del Cauca con la relación calcio-magnesio invertida. II-Efecto de varias enmiendas en las propiedades químicas y físicas de un suelo de Guayabito. Revista ICA (Colombia) v.6 no.1, p.57-72. 1971.
34. MAYLAND, H. F.; GRUNES, D. L. Magnesium concentration in Agropyron desertorum fertilized with magnesium and nitrogen. Agronomy Journal (Estados Unidos) v.66 no.1, p.78-82. 1974.
35. MEDINA, H.; LUNA, C. Revisión de las investigaciones sobre suelos ácidos y enclamiento realizadas en Colombia. Suelos Ecuatoriales (Colombia) v.3 no.1, p.102-132. 1971.
36. MEJIA C., L. Principales características físicas, químicas, mineralógicas y micromorfológicas de los suelos de la cuenca alta del Río Bogotá / Clasificación tentativa en el sistema de la séptima aproximación. Bogotá, IGAC-Subdirección Agrológica, 1967. s.p. (Informe interno, sin publicar).
37. METSON, A. J.; GIBSON, E. J. Magnesium in New Zealand soils. New Zealand Journal of Agricultural Research v.20 no.2, p.163-184. 1977.

38. MOKWUNYE, A. U.; MELSTED, S. W. Magnesium forms in selected temperate and tropical soils. Soil Science Society of American Proceedings (Estados Unidos) v.36 no.5, p.762-764. 1972.
39. \_\_\_\_\_ ; \_\_\_\_\_. Magnesium fixation and release in soils of temperate and tropical origins. Soil Science (Estados Unidos) v.116 no.5, p.359-362. 1973.
40. MOSTAFA, M. A. E.; ULRICH, A. Interaction of calcium and magnesium in nutrition of intact sugar beets. Soil Science (Estados Unidos) v.121 no.1, p.16-20. 1976.
41. MUÑOZ A., R. Factores que afectan la aprovechabilidad de los nutrimentos nitrógeno, fósforo, potasio, calcio y magnesio para las plantas. En: Concepto básico sobre suelos y fertilizantes. Palmira, Abocol-monómeros Colombo-Venezolanos. 1974. p.1-45.
42. \_\_\_\_\_. Respuesta de los cultivos al calcio, magnesio y azufre en suelos de clima frío de Colombia. Suelos Ecuatoriales (Colombia) v.10 no.2, p.156-185. 1979.
43. NEMETH, K. The effect of potassium fertilization and potassium removal by ryegrass in pot experiments on the potassium concentration of the soil solution of various soils. Plant and Soil (Holanda) v.42 no.1, p.97-107. 1975.

44. NEMETH, K.; MENGEL, K.; GRIMME, H. The concentration of potassium, calcium and magnesium in the saturation extract in relation to exchangeable K, Ca and Mg. *Soil Science (Estados Unidos)* v.109 no.3, p.179-185. 1970.
45. NOWAKOWSKI, T.Z.; BOLTON, J.; LAZARUS, W. Effects of form and amounts of nitrogen and magnesium fertilisers on the yield and on the inorganic and organic composition of Italian ryegrass grown on magnesium deficient soil. *Journal of the Science of Food and Agriculture (Inglaterra)* v.26, p.1483-1492. 1975.
46. RAMIREZ V., A. Evaluación de la relación calcio/magnesio en suelos del Valle del Cauca. *Suelos Ecuatoriales (Colombia)* v.10 no.2, p.147-155. 1979.
47. RICE, H. B.; KAMPRATH, E. J. Availability of exchangeable and nonexchangeable Mg in sandy coastal plain soils. *Soil Science Society of America Proceedings (Estados Unidos)* v.32 no.3, p.336-338. 1968.
48. SALMON, R. C. Cation-activity ratios in equilibrium soil solutions and the availability of magnesium. *Soil Science (Estados Unidos)* v.98 no.4, p.213-221. 1964.

49. SALMON, R. C.; ARNOLD, P. W. The uptake of magnesium under exhaustive cropping. *Journal of Agricultural Science (Inglaterra)* v.61 no.3, p.421-425. 1963.
50. SHARMA, P. K.; KAISTHA, B. P.; TRIPATHI, B. P.; GUPTA, R. D. Forms and distribution of magnesium in relation to important soil properties in some soils of Himachal Pradesh in North West India. *Agrochimica (Italia)* v.21 no.6, p.529-534. 1977.
51. SNEDECOR, G. W.; COCHRAN, W. G. *Statistical methods*. 6 ed. Ames, Iowa State University, 1976. 593p.
52. SUMNER, M. E.; FARINA, P. M. W.; HURST, V. J. Magnesium fixation - a possible cause of negative yield responses to lime applications. *Communications in Soil Science and Plant Analysis (Estados Unidos)* v.9 no.10, p.995-1007. 1978.
53. TELLEZ C., O. Estudio del mangesio en varias series de suelos de la Sabana de Bogotá. Bogotá, Universidad Jorge Tadeo Lozano, Facultad de Agrología, 1977. 66p. (Tesis Agrólogo).
54. THILL, J. L.; GEORGE, J. R. Cation concentrations and K to Ca+Mg ratio of nine cool-season grasses and implication with hypomagnesaemia. *Agronomy Journal (Estados Unidos)* v.67 no.1, p.89-91. 1975.

55. THOMPSON, L. M.; TROEH, F. R. Soils and soil fertility. 4 ed. New York, McGraw-Hill, 1978. p.310-312.
56. TURNER, M. A.; NEALL, V. E. Survey of magnesium content of soils and pastures and incidence of grass tetany in three selected areas of Taranaki. New Zealand Journal of Agricultural Research. v.21 no.4, p.583-592. 1978.
57. WADA, K. Allophane and imogolite. En: . Dinaver, R. C. Minerals in soil environments. Madison, Wis., SSSA, 1977. p.619.

A P E N D I C E

Tabla 1. Rendimiento de la cosecha (en base seca) por materia y por corte.

Suelo	Con magnesio			Sin magnesio		
	1º corte	2º corte	3º corte	1º corte	2º corte	3º corte
	----- gramos			1/	-----	
1	1,08	0,91	1,15	1,11	0,67	0,86
2	1,54	1,67	1,88	2,14	1,63	2,06
3	1,33	1,05	1,70	1,32	1,02	1,42
4	0,93	0,54	0,46	0,80	0,60	0,46
5	1,15	0,87	0,67	0,86	0,66	0,78
6	1,36	0,86	1,11	0,90	0,71	1,07
7	2,24	1,26	1,74	2,07	1,40	2,21
8	1,25	1,18	1,61	1,30	0,97	1,49
9	1,09	0,69	1,58	1,34	0,87	1,20
10	0,72	0,54	0,91	0,62	0,68	0,94
11	1,10	0,92	1,66	0,99	0,89	1,76
12	0,89	1,38	1,62	1,02	1,05	2,01
13	0,79	0,94	1,18	0,59	0,85	1,46
14	0,29	0,73	0,59	0,15	0,32	0,24
15	0,52	0,96	1,57	0,63	0,69	1,80
16	0,25	0,39	0,40	0,24	0,27	0,35
17	0,91	1,13	1,78	1,12	1,00	1,66
18	1,11	0,77	1,56	0,88	0,81	1,26
19	1,10	1,21	1,87	1,30	1,25	1,68
20	0,60	0,87	0,95	0,53	0,57	0,81

1/ Cada valor es el promedio de 3 replicaciones.

Tabla 2. Polinomios de segundo grado y coeficientes de determinación ( $R^2$ ) para la regresión entre Mg-intercambiable o porcentaje de saturación de magnesio y las variables de respuesta.

Polinomios	$R^2 \times 100$
$Y_1 = 99,9656 - 9,2919X + 2,1222X^2$	14,52
$Y_1 = 76,0908 + 4,3840X_i - 0,1980X_i^2$	5,57
$Y_2 = 9,1336 + 1,7728X + 0,4054X^2$	56,28**
$Y_2 = -0,1342 + 3,6623X_i - 0,1478X_i^2$	33,52*
$Y_3 = 39,3271 + 14,1245X - 0,5972X^2$	72,35**
$Y_3 = 30,6741 + 8,0831X_i - 0,3126X_i^2$	51,62**
$Y_4 = 0,1155 + 0,1590X - 0,0187X^2$	35,68*
$Y_4 = 0,1249 + 0,0427X_i - 0,0013X_i^2$	84,69**

X: Mg-intercambiable

$X_i$ : % saturación de Mg

$Y_1$ : % rendimiento relativo

$Y_2$ : absorción total de Mg

$Y_3$ : % absorción relativa

$Y_4$ : % Mg en primer corte

\*: Significativo al nivel del 5%

\*\* : Significativo al nivel del 1%

Tabla 3. Cálculos para determinar el nivel crítico por el método matemático de Cate y Nelson (5).

Porcentaje de absorción relativa y Mg-intercambiable					
Ultimo valor de Mg-int en población 1	$\bar{X}_1$	S.C. Pobl. 1	$\bar{X}_2$	S.C. Pobl. 2	$R^2$
2,07	61,6	2616	76,3	3498	0,139
2,16	58,9	3857	84,8	429	0,396
2,83	60,1	4129	86,6	336	0,371

Suma de cuadrados total (SCT) = 7101

Porcentaje de absorción relativa y porcentaje de saturación de magnesio .

Ultimo valor en % de  
saturación en pobl. 1

4,13	51,8	1630	74,8	3010	0,346
5,13	51,1	1643	77,1	2218	0,456
6,48	53,9	2210	77,2	2217	0,376

Suma de cuadrados total (SCT) = 7101

$\bar{X}$  : Promedio de % de absorción relativa en población 1 ó 2

S.C. : Suma de cuadrados corregida.

$R^2$  :  $SCT - SC_1 - SC_2 / SCT$

Tabla 4. Relaciones entre el calcio, el magnesio y el potasio intercambiables. 1/

Suelo	Ca/Mg	Mg/K ag.	Mg/K	Mg/Ca+Mg+K	K ag/Mg+Ca
1	6,9	1,2	1,3	0,12	0,11
2	1,6	1,0	1,1	0,14	0,37
3	3,8	1,1	1,2	0,18	0,19
4	2,9	9,1	24,4	0,25	0,03
5	3,0	2,4	3,1	0,21	0,10
6	3,0	1,4	2,0	0,22	0,14
7	3,1	2,9	3,7	0,23	0,09
8	2,3	5,0	6,7	0,29	0,06
9	6,7	4,5	5,6	0,13	0,03
10	2,0	1,8	3,4	0,29	0,17
11	1,8	1,3	3,0	0,32	0,16
12	2,3	2,0	2,2	0,16	0,15
13	2,5	1,6	1,9	0,25	0,18
14	3,0	0,6	0,6	0,18	0,42
15	3,3	1,1	1,2	0,19	0,21
16	3,5	2,4	3,1	0,21	0,09
17	3,4	0,5	0,5	0,16	0,46
18	3,6	6,2	8,3	0,21	0,03
19	5,7	0,5	0,5	0,12	0,28
20	11,2	0,4	0,5	0,07	0,18

K ag = K inicial mas el agregado como fertilizante.

Tabla 5. Porcentaje de saturación de magnesio . Porcentaje de arcilla y limo. <sup>1/</sup>

Suelo	% saturación Mg (CCC pH 7)	% saturación Mg (CCC efectiva)	Arcilla (%)	Arcilla+Li- mo (%)
1	10,2	11,9	34,8	62,2
2	12,5	30,9	29,7	54,1
3	2,7	16,9	28,1	64,0
4	15,3	23,2	19,2	32,0
5	19,4	25,6	26,2	49,5
6	7,4	22,8	36,5	71,4
7	11,1	23,0	28,7	64,5
8	18,7	33,8	27,7	56,4
9	12,4	12,9	42,0	75,3
10	5,1	15,3	42,4	63,7
11	7,0	20,4	44,2	74,7
12	6,5	25,2	24,7	77,0
13	4,1	17,4	55,0	87,8
14	3,0	18,3	24,6	76,0
15	7,4	17,1	29,6	77,1
16	2,2	18,3	23,0	73,8
17	3,2	16,3	37,3	79,2
18	15,0	20,6	48,7	82,4
19	2,1	8,9	27,7	69,2
20	1,4	7,0	14,5	44,1

<sup>1/</sup> Valores calculados con la información de la Tabla 1.

Tabla 6. Equivalencia en el Sistema Americano de Clasificación de Suelos de las Asociaciones empleadas en el presente estudio 1/

Asociación	Clasificación en el Sistema Americano
Cabrera-Cogua	
Cabrera	Inceptisol (Dystrandepts)
Cogua	Alfisol, Ultisol
Cabrera-Cruz Verde	
Cabrera	Inceptisol (Dystrandepts)
Cruz Verde	Inceptisol, Ultisol
Bermeo	Inceptisoles (Dystrandepts y Placandepts)
Tibaitatá-Zipacuirá-Corzo	Inceptisoles (Andepts)
Bojacá-Cogua-Techo	Alfisol
Cogua	Alfisol, Ultisol
Facatativá-Cabrera	Inceptisoles (Andepts)

1/ Información personal del Dr. Leonidas Mejía (CIAF)