

PN-AAU-497

43808

MÉTODOS QUÍMICOS PARA EL ANÁLISIS
DE SUELOS ACIDOS Y PLANTAS FORRAJERAS

José G. Salinas y Ramiro García

CENTRO INTERNACIONAL DE AGRICULTURA TROPICAL
PROGRAMA DE PASTOS TROPICALES
Apartado aéreo 6713, Cali, Colombia

Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT)
Apartado aéreo 6713
Cali, Colombia

ISBN 84-89206-50-3
Octubre 1985
Tirada 1000 ejemplares
Impreso en Colombia

Salinas, José, G. y García, Ramiro. 1985. Métodos químicos para el análisis de suelos ácidos y plantas forrajeras. Centro Internacional de Agricultura Tropical, Programa de Pastos Tropicales. Cali, Colombia. 83 p.

I. Salinas José. II. García Ramiro. III. Centro Internacional de Agricultura Tropical. IV Tit.

CONTENIDO

	<u>Página</u>
Introducción	1
1. GENERALIDADES SOBRE MEDICIONES Y REGISTROS EN ANALISIS DE SUELOS Y PLANTAS	3
1.1 La Precisión y la Exactitud	4
1.1.1 Medida de la precisión y factores que la afectan	4
1.1.2 Medida de la exactitud y forma de mejorarla	6
1.2 Medición Precisa y Exacta de Valores	7
1.3 Registro de Datos y Cifras Significativas	8
2. LA MUESTRA	10
2.1 Importancia de la Muestra	11
2.2 Toma de la Muestra y su Envío al Laboratorio	11
2.3 Preparación de la Muestra en el Laboratorio	12
2.3.1 Muestras de suelo	12
2.3.2 Muestras de tejido vegetal	15
2.4 Almacenamiento de Muestras	16
3. METODOLOGIA PARA EL ANALISIS DE SUELOS ACIDOS NO CALCAREOS NI SALINOS	17
3.1 Submuestreo en el Laboratorio	18
3.2 Análisis Preliminar del Suelo	18
3.2.1 Determinación de pH (Suelo:agua 1:1) ...	19
3.2.2 Determinación de la conductividad eléctrica	20
3.2.3 Comprobación de la presencia de CaCO_3 (prueba de efervescencia)	21
3.3 Determinación de Materia Orgánica	21
3.4 Determinación de Fósforo	23
3.4.1 Método de extracción por fluoruro-ácido diluídos (Bray y Kurtz)	23

3.4.2	Método de extracción de fósforo por carbonato ácido de sodio	26
3.4.3	Método de extracción de fósforo por Bray 2 modificado	29
3.5	Determinación de la Acidez Intercambiable y los Cationes Cambiables en Suelos con pH Menor que 5.4	33
3.5.1	Obtención del extracto del suelo	33
3.5.2	Acidez intercambiable (Al + H)	34
3.5.3	Calcio (Ca)	35
3.5.4	Magnesio (Mg)	36
3.5.5	Manganeso (Mn)	37
3.5.6	Determinación de potasio (K) con solución extractora de NH_4Cl 1N	37
3.5.7	Determinación de potasio (K) con extractor de Bray 2	38
3.5.8	Parámetros derivados	39
3.5.8.1	Capacidad de intercambio catiónico efectivo (CICE)	39
3.5.8.2	Porcentaje de saturación de aluminio	40
3.6	Cationes Cambiables en Suelos con pH 5.6-7.0, con Carga no Dependiente del pH	40
3.6.1	Obtención del extracto del suelo	41
3.6.2	Determinaciones de calcio (Ca), magnesio (Mg) y potasio (K)	42
3.6.3	Determinación de sodio (Na)	43
3.7	Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC) en Suelos con pH 5.4-7.0 y Carga no Dependiente del pH	44
3.8	Determinación de Azufre (S)	45
3.8.1	Obtención del extracto del suelo	45
3.8.2	Método turbidimétrico para determinar azufre en el extracto	46
3.9	Determinación de Micronutrientes y Manganeso	48
3.9.1	Boro (B)	48
3.9.2	Zinc (Zn), cobre (Cu), hierro (Fe), manganeso (Mn)	50

4.	METODOLOGIA PARA EL ANALISIS QUIMICO DE PLANTAS FORRAJERAS	52
4.1	Determinación de Nitrógeno	53
4.2	Determinaciones de Fósforo, Potasio, Calcio, Magnesio, Azufre y Aluminio	54
4.2.1	Obtención del extracto de tejido vegetal	54
4.2.2	Fósforo (P), calcio (Ca) y magnesio (Mg)	55
4.2.3	Potasio (K)	56
4.2.4	Azufre (S)	56
4.2.5	Aluminio (Al)	58
4.3	Determinaciones de Zinc, Cobre, Hierro, Manganeso y Sodio	60
4.3.1	Obtención del extracto	60
4.3.2	Determinaciones	60
4.4	Determinación de Boro	61
4.5	Determinación de Sílice Cruda	62
5.	DIAGNOSTICO NUTRICIONAL EN SUELOS ACIDOS Y PASTOS TROPICALES	64
5.1	El Diagnóstico Nutricional. Importancia y Secuencia	65
5.2	Parámetros Químicos Edáficos	67
5.3	Niveles Críticos Nutricionales en Pastos Tropicales	75
5.3.1	Factores que afectan los niveles críticos nutricionales	76
	REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS	79

1'

Introducción

El análisis cuantitativo de suelos y tejidos vegetales es un instrumento eficaz para detectar deficiencias o excesos de minerales y para proveer, siempre y cuando sus resultados se usen adecuadamente, una base para las recomendaciones sobre fertilización.

Sin embargo, existe en el proceso un conflicto entre las fases de cuantificación o medida, interpretación de resultados y recomendaciones, como resultado de la alta variabilidad que éstas presentan. Esta variabilidad, desventajosa para el intercambio y la difusión rápida de tecnología, se debe generalmente a la diversidad de los métodos que se usan en los análisis de suelos y plantas, y a la diversidad de criterios técnicos que se aplican para interpretar los resultados y ofrecer recomendaciones.

Probablemente resulte utópico tratar de unificar las tres fases mencionadas para todos los suelos existentes en los países, así como para todos los tejidos vegetales; sin embargo, se intenta hacerlo con respecto a los suelos de América tropical con propiedades químicas comparables. Con este criterio se ha elaborado el presente manual, en el cual se describen métodos estandarizados de procedimientos para el análisis de suelos y tejidos vegetales, buscando alcanzar por lo menos tres objetivos:

1. Proveer a los investigadores de América tropical información sobre la metodología existente para los análisis de suelos ácidos y plantas del trópico.
2. Incrementar entre las mismas instituciones nacionales e internacionales un intercambio de información sobre las metodologías empleadas en América tropical, para definir y aplicar la mejor entre las disponibles.
3. Hacer que los análisis de suelos y de plantas constituyan una parte dinámica de la investigación que permita la recomendación de insumos adecuados.

La mayoría de los métodos y procedimientos que se presentan aquí se utilizan actualmente en el Laboratorio de Servicios Analíticos del Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT). Muchos de ellos se describen en forma suficientemente detallada, de tal manera que los laboratorios pueden aplicarlos, si lo desean, sin consultar otras fuentes; sin embargo, en algunos casos tendrán que modificarlos para adaptarlos a sus propias condiciones, especialmente en lo que respecta a los materiales que se emplean.

Cuando los investigadores necesiten información detallada sobre los principios de la teoría o sobre la técnica de un método, deben consultar la literatura pertinente. Para el efecto se incluyen algunas referencias bibliográficas.

**1. GENERALIDADES SOBRE MEDICIONES Y REGISTROS EN ANALISIS DE
SUELOS Y PLANTAS**

1.1 La Precisión y la Exactitud

Al efectuar un análisis, el laboratorista debe verificar en primer lugar la precisión de las mediciones para luego buscar su exactitud. La precisión se refiere a la dispersión de los datos obtenidos en las repeticiones de un análisis, de tal manera que si aquélla es grande, la precisión es baja y viceversa. La exactitud alude al mayor o menor ajuste que tengan los resultados con respecto al valor real del sistema o medio que se mide. Se observa, por lo tanto, que un método de análisis puede tener mucha precisión pero poca exactitud. Los análisis deben cumplir con ambas condiciones.

1.1.1 Medida de la precisión y factores que la afectan

Cuando se trata de análisis de suelos o de tejidos vegetales, la precisión depende principalmente de la precisión del método (incluido el instrumento), del tamaño y calidad de la muestra y del cuidado que tenga el laboratorista al efectuar el análisis y registrar los datos.

En cuanto al método hay que considerar que su precisión está afectada por el error visual del operador, el cual equivale a la mitad de la última cifra legible del instrumento. Por lo tanto, si un instrumento puede registrar valores cercanos a 0.1, quiere decir que es posible leer en él con una confianza de ± 0.05 .

El error máximo se puede expresar como un valor absoluto o en forma relativa; en este último caso generalmente se presenta como porcentaje y se puede expresar así:

$$\text{Error relativo} = \frac{\pm 0.05}{\text{Valor de la lectura}} \times 100$$

De acuerdo con esta ecuación, el error relativo aumenta a medida que disminuye el valor de la lectura; así, en una lectura de 10 cm el

error relativo sería mayor que en una de 300 cm. Se observa que el error máximo relativo se puede controlar variando el error máximo absoluto o el tamaño de la muestra.

Ejemplo: si se quiere pesar una muestra para un análisis con un error máximo relativo del 1% de la masa, se puede usar 1 g de suelo y un error máximo absoluto de ± 0.005 g, ó 10 g de muestra y un error máximo absoluto de ± 0.05 g.

Una medida de la precisión del análisis o ensayo está constituida por los límites de confianza (LC), los cuales representan los valores máximo y mínimo dentro de los cuales deben encajar los resultados.

Partiendo de la base de un error máximo en el instrumento de ± 0.05 (con 100% de probabilidad) y de que el valor de una medición equivale al promedio de las repeticiones, los límites de confianza para cada lectura serían:

$$LC = \text{Promedio} \pm 0.05$$

Los límites de confianza también se pueden expresar en forma más general (Steel y Torrie, 1960) de la manera siguiente:

$$LC = \text{Promedio} \pm t_{\alpha} \cdot s \cdot \left(\frac{1}{n} \right)^{\frac{1}{2}}$$

en donde:

LC = límites de confianza de un valor pronosticado

t_{α} = valor de t correspondiente a una probabilidad (α) con (n - 1) grados de libertad

s = desviación estándar del valor de una lectura

n = número de lecturas

La precisión del análisis también depende de la naturaleza y el tamaño de la muestra. En la práctica, un análisis de suelo o de tejido vegetal comprende la medición de varias muestras cuyas lecturas pueden presentar dispersión. Pero la dispersión también puede tener su

origen en la variabilidad del material; por lo tanto, es necesario mezclar bien las muestras compuestas para obviar ese problema en las repeticiones.

Para evitar esa variabilidad el tamaño de la muestra debe ser adecuado; así, se cree que para determinar la densidad de los sólidos de un suelo la muestra mínima debe ser de 1 g. Si se usara una muestra de 0.01 g habría poca oportunidad de tener representado en ella el promedio típico de la densidad del suelo; la muestra más grande, en cambio, puede contener todos los constituyentes característicos del suelo de la muestra.

1.1.2 Medida de la exactitud y forma de mejorarla

Mientras la precisión se refiere a la dispersión de los resultados de un análisis, la exactitud se refiere a su desviación con respecto al valor real o verdadero. Se trata entonces de un sesgo en el ensayo, sesgo que se puede controlar en el laboratorio por medio de calibraciones y de muestras control.

La exactitud se puede medir por medio del coeficiente de variación, así:

$$CV = \frac{s_{\bar{X}}}{\bar{X}} \times 100$$

en donde:

CV = coeficiente de variación

$s_{\bar{X}}$ = desviación estándar de la media

\bar{X} = promedio de valores observados

El error en la exactitud debido al sesgo puede ser sistemático o aleatorio.

Un error es sistemático cuando aparece constantemente en todos los resultados, a causa de una falla en el instrumento o de una falla o sesgo en la calibración del mismo, o en el procedimiento. Es un tipo de error reproducible, que no se puede eliminar con repeticiones y que por lo tanto puede presentar mucha concordancia en las repeticiones sin que los resultados correspondan a la realidad. Para corregirlo es necesario revisar el método o el instrumento.

Error aleatorio es el que ocurre cuando en un número grande de determinaciones de la misma muestra (repeticiones), los valores varían dentro de ciertos límites. El rango de los límites de la distribución de estos valores puede depender del instrumento o del procedimiento usado. En determinaciones precisas se asume que el error tiene un rango de distribución muy estrecho y para corregirlo se apela generalmente al uso de muestras duplicadas; la segunda muestra (testigo) sirve para verificar la técnica del operador.

1.2 Medición Precisa y Exacta de Valores

Hay muchas mediciones de laboratorio que tienen que ser precisas y exactas, o sea que sus valores esperados deben ser iguales dentro de los límites de precisión dados para el análisis (ej., dentro de ± 0.1 g o dentro de $\pm 5\%$ del valor).

Por lo tanto, es necesario revisar la técnica de análisis, lo que generalmente se hace mediante ensayos previos, por triplicado; si en por lo menos dos de las repeticiones los resultados se ajustan a las especificaciones, se toma en cuenta el promedio de los valores conformes; si los tres ensayos se desvían, se descartan.

Cuando se tienen dos muestras se hace referencia al promedio de sus resultados y al intervalo entre ellos; si hay más de dos muestras se alude a su promedio y a la desviación estándar del mismo, como una medida de exactitud.

La desviación estándar se puede mejorar aumentando el número de muestras, de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$n = \frac{t_{\alpha}^2 \times s^2}{D^2}$$

donde:

- n = número de muestras
- s = desviación estándar
- t_α = valor de t con (n-1) grados de libertad a un nivel dado de probabilidad
- D = precisión deseada (P = 0.05 ó 0.01)

Para saber si es necesario tomar más muestras, se usa la desviación estándar obtenida en el ensayo de prueba (Peterson y Calvin, 1965). Esta técnica se usa cuando se tiene como fin comparar promedios de diferentes parcelas y es especialmente útil para estudiar respuestas a tratamientos.

1.3 Registro de Datos y Cifras Significativas

El número de cifras significativas dentro de una cantidad no depende del signo decimal en la cantidad, sino de los dígitos que son confiables y de las características de la cantidad considerada; por ejemplo, si la cantidad es 0.025, los tres números después del punto decimal son confiables. Si la cantidad es 25,000 y sabemos que el tercer dígito es confiable, se debe escribir el número como 2.50 x 10⁴, o también 25.0* 00.

En la práctica, los registros de datos se hacen con una cifra adicional a la última cifra significativa. Posteriormente, en el resultado final, sólo se emplean las cifras significativas.

En los análisis de suelos y plantas por lo general se miden varias cantidades a varios niveles de precisión (i.e., hasta un número dado de cifras decimales o hasta tantas cifras significativas). Como al hacer los cálculos se combinan cifras con diversos grados de precisión, hay que saber de qué manera estas combinaciones afectan el resultado final.

A este respecto, las siguientes reglas son muy útiles:

1. En las sumas y en las restas se debe retener sólo la cantidad de cifras decimales confiables existentes en la cifra que tenga el menor número de ellas.
2. En las multiplicaciones y en las divisiones no se deben retener más cifras significativas que las cifras confiables en el factor con la menor cantidad de cifras significativas; en otras palabras, las cantidades que tienen que ser multiplicadas o divididas deben tener el mismo número de cifras significativas. Es recomendable mantener una cifra más de las que las reglas indican hasta cuando se obtenga el resultado final (Minor, 1957).

Los cálculos generalmente incluyen una combinación de las operaciones matemáticas descritas en las reglas. Al realizar uno de ellos, es necesario aplicar las reglas para evaluar su efecto total. Para mayor información al respecto, se puede consultar a Minor (1957) y Olson et al (1956).

2. LA MUESTRA

2.1 Importancia de la Muestra

Para la determinación cuantitativa del contenido de un mineral específico en una muestra de suelo o de planta se requieren dos fases básicas; la primera fase corresponde a un procedimiento adecuado de muestreo, el cual involucra la toma de la muestra en sí y su correcta identificación; la segunda fase comprende la preparación apropiada de la muestra y su análisis.

La primera fase, el muestreo, es la más crítica, ya que las posibles deficiencias que hayan ocurrido en ella no se pueden superar durante el análisis, aunque éste sea exacto. En otras palabras, los resultados obtenidos en el análisis no pueden ser mejores que la muestra.

2.2 Toma de la Muestra y su Envío al Laboratorio

Existen varios procedimientos vigentes para el muestreo de suelos y de tejido vegetal, procedimientos que se pueden encontrar en la literatura sobre el tema (ver referencias al final de la publicación); al respecto sobresalen los trabajos de Chapman y Pratt (1961), Cline (1944), Hausenbuiller (1957), Peck y Melsted (1973) y Reed y Rigney (1947).

Aunque los procedimientos para el muestreo varían según el objetivo, existen requisitos comunes que se deben cumplir en todos los casos; entre ellos están:

- a) Obtener una muestra representativa
- b) Evitar la contaminación
- c) Identificar la muestra en forma adecuada
- d) Embalar y transportar las muestras al laboratorio lo más pronto posible.

En la mayoría de los casos, las muestras de suelo y de tejido vegetal se empaacan en bolsas de plástico (polietileno) para enviarlas al análisis, siguiendo el procedimiento que el laboratorio escogido tenga establecido para el efecto. En términos generales, para un análisis químico completo bastan 100 gramos de suelo seco al aire, o 100 g de tejido vegetal fresco.

En el caso del Laboratorio de Servicios Analíticos del CIAT, el usuario debe llenar en duplicado un formulario de solicitud de análisis (Figura 2.1) y enviarlo junto con las muestras. Es muy importante que el análisis solicitado se concentre en aquellas determinaciones que el usuario necesita realmente para explicar y alcanzar los objetivos de un experimento.

Una vez realizado el análisis, el laboratorio devuelve al usuario el formulario original con los resultados y conserva la copia para su control y archivo.

2.3 Preparación de la Muestra en el Laboratorio

2.3.1. Muestras de suelo

En este caso la preparación incluye el secado, la molienda y el empaque cuando las muestras no se van a analizar de inmediato, así:

1. Las muestras, debidamente identificadas, se llevan al secador en bandejas de madera con bases de anjeo para facilitar el flujo del calor. El aire se calienta por medio de bombillas eléctricas y circula de la parte inferior hacia la superior con la ayuda de un extractor, el cual elimina la humedad de las bandejas. En promedio, la temperatura es de 60°C y el tiempo de secado varía entre 24 y 48 horas, según sea el grado de humedad inicial de las muestras.

2. Una vez seca la muestra se muele con un rodillo de madera o en molinos con cabezal y cribas de acero inoxidable; así, estos materiales no ofrecen obstáculos para el posterior análisis de micronutrientes. Para la mayoría de los análisis rutinarios de suelos las cribas deben corresponder a una malla no. 10 (2 mm); sin embargo, para la determinación de materia orgánica se recomienda tamizar el suelo con una malla no. 60 (0.25 mm).
3. El material molido se empaqueta en cajas de cartón de 250 g de capacidad, las cuales se identifican con una numeración seriada para pasarlas al laboratorio.

Es importante resaltar que las muestras así preparadas deben pasar inmediatamente al análisis químico, y que los resultados se deben referir a análisis con base en "suelo seco al aire". Si las muestras se almacenan temporalmente, al momento del análisis es necesario determinar para cada una de ellas un factor de humedad (FH), y ajustar con él los resultados para reducir el error.

El FH se determina secando una submuestra de 10 g exactos de suelo seco al aire, a 105°C durante un período mínimo de 12 horas y aplicando la siguiente fórmula:

$$FH = \frac{10 \text{ g}}{\text{Peso del suelo seco a } 105^{\circ}\text{C}}$$

Una vez calculado el FH se determina el contenido de humedad en la muestra de suelo (Gardner, 1965), así:

$$\text{Humedad (\%)} = 100 \cdot (FH - 1.00)$$

De esa manera, los resultados de los análisis se presentan en términos de "suelo seco" (105°C).

2.3.2 Muestras de tejido vegetal

Antes del análisis químico, las muestras del tejido vegetal generalmente se someten a cuatro fases de preparación (Jones y Steyn, 1973), así:

1. Limpieza del material para remover la contaminación superficial.
2. Secado del material, para detener las reacciones enzimáticas que puedan ocurrir en él y prepararlo para la molienda.
3. Molienda mecánica, para dar al material una finura apropiada para el análisis químico.
4. Secado final a peso constante, para obtener un valor uniforme que sirva de base para referir los resultados analíticos.

La limpieza es necesaria, ya que el material vegetal de la muestra siempre está cubierto con una capa fina de polvo que afecta los resultados del análisis. Los procedimientos recomendados para eliminar la contaminación del material vegetal van desde la limpieza con un paño o cepillo de cerdas finas, hasta el lavado con una solución de detergente al 0.1% (Steyn, 1959; Jones y Steyn, 1973).

El proceso de lavado debe ser lo más rápido posible para evitar períodos largos de contacto entre el tejido vegetal y la solución y el consiguiente riesgo de lixiviar ciertos nutrimentos como el K y el Ca (Jones y Steyn, 1973). Enseguida se secan las muestras a 70°C durante 24 horas y se muelen en molinos tipo Wiley con cribas de acero inoxidable de 1 mm.

El tejido vegetal seco y molido se empaca en frascos de plástico de 25 g de capacidad mínima, los cuales se sellan herméticamente para prevenir cambios de humedad en las muestras; luego se identifican con una numeración seriada para pasarlos al laboratorio. Si los frascos no se sellan, las muestras se deben secar nuevamente antes de analizarlas.

2.4 Almacenamiento de Muestras

Después de analizar las muestras de suelo o de tejido vegetal, el laboratorio las almacena bajo inventario durante seis meses, como medida de precaución para el caso en que el usuario solicite determinaciones adicionales. Al cabo de ese tiempo, las muestras se devuelven a los usuarios.

El laboratorio conserva además una serie de muestras de suelo y tejido vegetal que utiliza como controles en los diferentes análisis. Toda muestra almacenada se debe secar nuevamente antes de someterla a un nuevo análisis y los resultados se deben ajustar con base en el factor de humedad.

-17-

**3. METODOLOGIA PARA EL ANALISIS DE SUELOS ACIDOS NO CALCAREOS
NI SALINOS**

3.1 Submuestreo en el Laboratorio

Para que las determinaciones resulten precisas y exactas, la porción de suelo destinada a cada una de ellas debe ser representativa de la muestra llegada al laboratorio.

Es importante, por lo tanto, mezclar muy bien la muestra y luego someterla a un submuestreo con destino a las diferentes determinaciones. Para efectuar el submuestreo, el suelo se extiende sobre una hoja de papel limpio y, con ayuda de una regla de plástico, se divide en cuadrados de 5 x 5 cm, los cuales constituirán las submuestras.

Las submuestras se recogen con una espátula y se colocan en bolsas individuales de polietileno. Para un análisis químico completo se toman 10 submuestras, dos de las cuales están destinadas a un análisis preliminar que permite orientar mejor los análisis siguientes.

Después de tomar las submuestras, los excedentes de la muestra se almacenan durante seis meses, como se indicó antes.

3.2 Análisis Preliminar del Suelo

Cuando se trata de suelos calcáreos o salinos, la determinación de cationes intercambiables y de la capacidad de intercambio catiónico requiere procedimientos diferentes (Vehara y Keng, 1975) de los indicados en el presente manual.

Por lo tanto, antes de iniciar esas determinaciones, es importante efectuar un análisis preliminar de la muestra, el cual incluye determinación de pH, conductividad eléctrica (para detectar contenido de sales) y detección de presencia o ausencia de CaCO_3 .

Este análisis preliminar permite clasificar los suelos en los grupos que indica el Cuadro 3.1. La metodología que se ofrece en el presente manual es aplicable específicamente a los suelos incluidos en los dos primeros grupos: suelos muy ácidos o ácidos a neutros, no calcáreos y no salinos.

Cuadro 3.1. Clasificación de los suelos según resultados del análisis preliminar.

pH	Características ^a		Clasificación
	Conductividad eléctrica (µmhos/cm)	CaCO ₃ libre	
<5.4	<400	Ausente	Muy ácido, no calcáreo, no salino
5.4-7.0	<400	Ausente	Acido a neutro, no calcáreo, no salino
>7.0	<400	Presente	Calcáreo, no salino
<7.0	>400	Ausente	No calcáreo, salino
>7.0	>400	Presente	Calcáreo, salino

a/ Determinadas así: pH en solución suelo-H₂O 1:1; conductividad eléctrica a 25°C; presencia de CaCO₃ por la prueba de efervescencia.

3.2.1 Determinación de pH (Suelo-agua 1:1)*

Materiales:

Potenciómetro (pH-metro) provisto de electrodos de vidrio y calomel (solución saturada de KCl). Soluciones amortiguadas de pH conocido (generalmente de pH 4 y 7). Vasos de 50 ml, agitador y balanza analítica (+ 0.1 g).

* Jackson (1964), Peech (1965).

Procedimiento:

1. Pesar 10 g de suelo seco al aire y transferir a un vaso de 50 ml. Añadir 10 ml de agua doblemente deionizada o destilada.
2. Agitar la suspensión durante 1 min aproximadamente y dejar en reposo por 1 h.
3. Una vez calibrado el potenciómetro con las soluciones amortiguadas, se procede a determinar el pH de la muestra de suelo, previa agitación enérgica de la suspensión.

3.2.2 Determinación de la conductividad eléctrica*

La medida de la conductividad eléctrica del extracto del suelo sirve como una guía apenas aproximada, pero rápida, del grado de salinidad en el suelo.

Materiales:

Vasos de 100 ml, varillas de vidrio, puente de conductividad eléctrica.

Reactivos:

Agua doblemente deionizada o destilada.

Procedimiento:

1. Pesar 10 g de suelo seco al aire y tamizado con malla no.10 (2 mm) y colocar en un vaso de 100 ml.
2. Añadir 50 ml de agua doblemente deionizada o destilada y agitar por 30 mn. Dejar la suspensión en reposo durante la noche.
3. Pasado ese tiempo, agitar de nuevo por 15 min y leer la conductividad eléctrica, usando un puente de conductividad.

Los resultados se expresan en micromhos/cm a 25°C.

* Richards (1954).

3.2.3 Comprobación de la presencia de CaCO_3 libre (prueba de efervescencia)*

La presencia o ausencia de carbonato de calcio se puede determinar rápidamente y en forma cualitativa, agregando unas cuantas gotas de HCl al 30% al suelo seco al aire y tamizado con malla no.10 (2 mm). La efervescencia debida al desprendimiento de gas carbónico (CO_2) indica la presencia de carbonato.

3.3 Determinación de Materia Orgánica**

Materiales:

Erlenmeyers de 250 ml, pipeta automática de 25 ml, garrafa de plástico de 20 lt (para el dicromato de potasio), buretas graduadas de 50 ml (para el ácido sulfúrico y el sulfato ferroso) y balanza de precisión (de ± 0.01 g).

Reactivos y su preparación:

1. Solución de dicromato de potasio ($\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$) 0.4N. Secar aproximadamente 50 g del reactivo en una estufa a 110°C de temperatura durante 1 h; después de enfriar en un desecador, pesar 19.583 g y disolver en poca cantidad de agua doblemente deionizada o destilada; completar luego el volumen a 1 lt, con agua doblemente deionizada o destilada.
2. Acido sulfúrico concentrado (H_2SO_4).
3. Solución de ferrofina 0.025M. Pesar 4.95 g de ortofenantrolina monohidratada ($\text{C}_{12}\text{H}_8\text{N}_2\cdot\text{H}_2\text{O}$) y 6.95 g de sulfato ferroso ($\text{FeSO}_4\cdot 7\text{H}_2\text{O}$); disolverlos en agua doblemente deionizada o destilada y completar el volumen a 1 lt con agua doblemente deionizada o destilada.
4. Solución de sulfato ferroso ($\text{FeSO}_4\cdot 7\text{H}_2\text{O}$) 0.4N. Para prepararla disolver 111.21 g del reactivo en 600 ml de agua

* Chapman y Pratt (1961).

** Walkley y Black (1934), Allison (1965).

doblemente deionizada o destilada, añadir 20 ml de H_2SO_4 concentrado y completar el volumen a 1 lt con agua doblemente deionizada o destilada.

Procedimiento:

1. Pesar 0.5 g de suelo seco al aire y tamizado con malla no.60 (0.25 mm), y pasarlo a un Erlenmeyer de 250 ml.
2. Añadir 25 ml de la solución de dicromato de potasio 0.4N y mezclar el suelo con la solución dándole un giro al Erlenmeyer.
3. Añadir 25 ml de H_2SO_4 concentrado y mezclar suavemente durante 1 min. Dejar la mezcla en reposo durante 20 a 30 min.
4. Simultáneamente realizar un ensayo de valoración en blanco (sin suelo) de la misma manera indicada en los numerales 1, 2 y 3.
5. Diluir la solución hasta 200 ml con agua doblemente deionizada o destilada y añadir 1 ml de la solución de ferroína 0.025M.
6. Titular con la solución de sulfato ferroso 0.4N hasta cuando el color de la solución muestra cambie de verde a rojo.

Cálculos:

El contenido de materia orgánica (M.O.) en el suelo se presenta en porcentaje, calculado según la fórmula siguiente:

$$M.O.(%) = 25 (1 - S/B) \times 0.55$$

donde:

25 = ml de dicromato de potasio

S = valoración de la muestra, en ml de solución de sulfato ferroso

B = valoración en blanco, en ml de solución de sulfato ferroso

0.55 = factor de corrección (FC), el cual se deriva como sigue:

$$FC = 0.4 \times 0.003 \times (1.72/0.75) \times (100/0.5) = 0.55$$

donde:

0.4 = normalidad de la solución de dicromato de potasio

0.003 = peso miliequivalente de carbono

1.72 = factor de conversión de carbono a materia orgánica

0.75 = factor de recuperación de carbono*

0.5 = peso de la muestra (g)

3.4 Determinación de Fósforo

La disponibilidad de fósforo en el suelo, así como la de los otros nutrimentos se estima multiplicando la cantidad de elemento extractado durante el análisis por un factor de dilución (FD) que varía según el elemento y el método de extracción usado. Así, para el caso del fósforo la fórmula general es:

$$P \text{ en el suelo (ppm)} = P \text{ muestra (ppm)} \times FD$$

En el presente manual se describen tres métodos de extracción para el P y la forma de calcular el FD en cada caso.

3.4.1 Método de extracción por fluoruro-ácido diluidos (Bray y Kurtz No.2)**

Materiales:

Vasos de extracción de 50 ml, agitador, pipetas manuales o automáticas de 20 ml, papel de filtro de 11 cm de diámetro (Whatman no.42 o equivalente), frasco de vidrio o plástico para la solución extractora, vaso de 1 lt para la solución de trabajo, diluidor manual o automático, colorímetro con filtro de 660 m μ y probetas de 10 y 25 ml para las soluciones A y B para desarrollo de color.

Reactivos y su preparación:

1. Solución extractora (HCl 0.1N + NH₄F 0.03N). Disolver 1.11 g de NH₄F y 16.64 ml de HCl 6N con agua doblemente deionizada o

* Bornemisza *et al.* (1979).

** Bray y Kurtz (1965), Dewis y Freitas (1970), McGaveston y Widowson (1978).

destilada y completar el volumen a 1 lt con agua doblemente deionizada o destilada.

2. Soluciones para desarrollo de color*

- a) Solución patrón A. Disolver 60 g de molibdato de amonio ($[\text{NH}_4]_6\text{Mo}_7\text{O}_{24}\cdot 4\text{H}_2\text{O}$) en 200 ml de agua doblemente deionizada o destilada. Añadir 1.455 g de tartrato de antimonio y potasio ($\text{K}[\text{SbO}]\text{C}_4\text{H}_4\text{O}_6\cdot \frac{1}{2}\text{H}_2\text{O}$) y disolver. Agregar lentamente y con agitación suave, 700 ml de H_2SO_4 concentrado. Enfriar la solución y diluir con agua doblemente deionizada o destilada a un volumen de 1 lt.
- b) Solución patrón B. Disolver 132 g de ácido ascórbico ($\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_6$) en agua doblemente deionizada o destilada. Completar el volumen a 1 lt con la misma agua.
- c) Solución de trabajo. Prepararla en el día, con base en las soluciones patrón A y B, así: tomar 25 ml de la solución A y transferirlos a un vaso de 1 lt, 800 ml de agua doblemente deionizada o destilada; mezclar y añadir 10 ml de la solución B; completar el volumen del vaso con agua doblemente deionizada o destilada.

3. Solución estándar con fósforo:

- a) Pesar 0.2195 g de fosfato dehidrogenado de potasio cristalizado (KH_2PO_4), previamente secado durante 1 h a 105°C .
- b) Diluir con agua doblemente deionizada o destilada en un matraz volumétrico de 1 lt y completar el volumen; la solución contendrá 50 ppm de P.
- c) De la solución anterior, tomar alícuotas de 2.5, 5.0, 10.0, 20.0, 30.0, 40.0 y 50.0 ml y diluir cada una de ellas a un volumen de 250 ml con agua doblemente deionizada o destilada. Así se obtienen soluciones cuya concentración respectiva será de 0.5, 1.0, 2.0, 4.0, 6.0, 8.0 y 10.0 ppm de P y con ellas se determina la curva patrón para este elemento.

* Murphy y Riley (1963).

Procedimiento:

1. Obtención del extracto del suelo
 - a. Pesar una muestra de 2.85 g de suelo y transferirla a un vaso de extracción de 50 ml.
 - b. Añadir 20 ml de la solución extractora y agitar durante 40 sg.
 - c. Filtrar la suspensión con papel filtro Whatman no. 42 o equivalente hacia un vaso de 50 ml. El filtrado constituye el extracto del suelo.
2. Con la ayuda de un "dilutor dispensador", llevar simultáneamente 2 ml del extracto de suelo y 18 ml de la solución de trabajo a tubos colorimétricos. Hacer otro tanto con las soluciones patrón de P (2 ml de solución patrón y 18 ml de solución de trabajo); de esa manera las concentraciones finales de P variarán entre 0.05 y 1.0 ppm.
3. A los 15 mn y hasta las 24 h después, se pueden leer los porcentajes de transmitancia (T) en un espectrofotómetro, usando una longitud de onda de 660 μ . Con estas lecturas se elabora un gráfico en papel semilogarítmico, en el cual la ordenada (escala logarítmica) representa los porcentajes de transmitancia y la abscisa (escala ordinaria) representa la concentración de P, en ppm. Con este gráfico es posible pasar directamente la lectura del colorímetro a partes por millón de P en la solución, durante el análisis de la muestra.

Cálculos.

El fósforo disponible en el suelo se calcula así:

$$P \text{ suelo (ppm)} = P \text{ muestra (ppm)} \times 70.2$$

en donde 70.2 es el factor de dilución (FD), que se calcula así:

$$FD = \frac{20\text{ml sln.extract.}}{1000\text{ml sln.extr.}} \times \frac{1000 \text{ g suelo}}{2.85 \text{ g suelo}} \times \frac{20\text{ml sln.final}}{2\text{ml extracto}} = 70.2$$

3.4.2 Método de extracción de fósforo por carbonato ácido de sodio*

Para la extracción del P en la muestra también se puede usar una disolución de carbonato ácido de sodio (NaHCO_3 0.5N) de pH 8.5; este método tiene su fundamento en que dicha solución controla la cantidad de Ca en la solución del suelo al formar carbonato de calcio.

Materiales:

Frascos de extracción de 250 ml o Erlenmeyers con tapón de vidrio Corning y resistente a los álcalis (también se han usado frascos de plástico con buenos resultados), agitador mecánico, papel de filtro Whatman no.42 de 15 cm de diámetro o equivalente, dilutor-dispensador, vaso de 1 lt, colorímetro con filtro de 660 m μ y frasco de polietileno para preparar la solución extractora.

Reactivos y su preparación:

1. Solución extractora (NaHCO_3 0.5N). Disolver 42 g de carbonato ácido de sodio (NaHCO_3) en 1 lt y con NaOH ajustar a un pH 8.5. Como la alcalinidad de esta solución tiende a aumentar con el tiempo, es necesario protegerlo con una capa de aceite mineral y verificar periódicamente el pH.
2. Carbón activado: se usa Darco G-60 o similar limpiándolo de fosfatos mediante una lixiviación previa con carbonato ácido de sodio; luego se lava con agua doblemente deionizada o destilada y se seca.
3. Soluciones para desarrollo de color.
 - a. Solución patrón A: Disolver 60 g de molibdato de amonio ($[(\text{NH}_4)_6 \text{Mo}_7\text{O}_{24} \cdot 4\text{H}_2\text{O}]$) en 200 ml de agua doblemente deionizada o destilada; añadir 1.455 g de tartrato de antimonio y potasio ($\text{K}[\text{SbO}]_4\text{C}_4\text{H}_4\text{O}_6 \cdot \frac{1}{2}\text{H}_2\text{O}$) y disolver. Agregar lentamente, con agitación suave, 700 ml de ácido sulfúrico concentrado (H_2SO_4). Enfriar la solución y diluir hasta el volumen de 1 lt con agua doblemente deionizada o destilada.

* Olsen et al. (1954).

- b. Solución patrón B: disolver 132 g de ácido ascórbico ($C_6H_8O_6$) en agua doblemente deionizada o destilada. Completar el volumen a 1 lt con agua doblemente deionizada o destilada.
 - c. Solución de trabajo: preparar esta solución en el día, a partir de las soluciones patrón A y B para desarrollo de color. Tomar 45 ml de la solución A y transferir a un vaso de 1 lt con 800 ml de agua doblemente deionizada o destilada; mezclar y añadir 18 ml de la solución B, completando luego el volumen con agua doblemente deionizada o destilada.
4. Solución estándar de fósforo.
- a) Disolver 0.2195 g de fosfato dehidrogenado de potasio cristalizado (KH_2PO_4), previamente secado a $105^\circ C$ durante 1 h.
 - b) Diluir con agua doblemente deionizada o destilada en un matraz volumétrico de 1 lt y completar el volumen. Esta solución contendrá 50 ppm de P.
 - c) Tomar de esta solución alícuotas de 2.5, 5.0, 10.0, 20.0, 30.0, 40.0 y 50.0 ml y diluir cada una de ellas a 250 ml de agua doblemente deionizada o destilada. Así se obtienen soluciones cuya concentración respectiva será de 0.5, 1.0, 2.0, 4.0, 6.0, 8.0 y 10.0 ppm de P, y con ellos se determina la curva patrón para ese elemento.

Procedimiento:

1. Extracto de suelo:
 - a. En un frasco de extracción colocar 2.5 g de suelo; adicionar 50 ml de solución extractora de carbonato de sodio (pH 8.5) y aproximadamente 1 g de carbón activado.
 - b. Agitar por 30 mn.
 - c. Filtrar la solución usando papel de filtro Whatman no.42 o su equivalente. Si el filtrado no es claro, retornar al frasco, añadir más carbón y agitar rápidamente, volviendo a filtrar por el mismo filtro.

2. Con una pipeta o un "dilutor dispensador", tomar 2 ml de filtrado, añadir 8 ml de agua doblemente deionizada o destilada y 10 ml de la solución de trabajo. Las diluciones patrón de P se deben someter al mismo procedimiento.
3. Después de 15 mn, leer los porcentajes de transmitancia (%T) en un espectrofotómetro o colorímetro, usando una longitud de onda de 660 mμ.
4. Llevar los valores de T a un gráfico en papel semilogarítmico: en la abscisa (escala ordinaria) se representan las cantidades de fósforo en la solución (ppm P) y en la ordenada (escala logarítmica) se presenta la proporción de transmisión de la luz (T). A partir del gráfico que resulta de unir los puntos obtenidos se pueden calcular las partes por millón de la solución-muestra, sólo leyendo en el colorímetro la T correspondiente.

Cálculos

La cantidad de P extraída por el método del carbonato ácido se calcula así:

$$P \text{ suelo (ppm)} = P \text{ muestra (ppm)} \times 200$$

donde 200 es el coeficiente de dilución (FD) y se calcula así:

$$FD = \frac{50\text{ml sln. extract.}}{1000\text{ml sln.extract.}} \times \frac{1000\text{g suelo.x20ml vol.final}}{2.5\text{g suelo } 2\text{ml extract.}} = 200$$

Nota: Los extractos de suelo obtenidos con carbonato de sodio presentan a menudo coloraciones intensas. Para eliminar esas interferencias debidas al color se recomienda el método del molibdato azul con ácido ascórbico.

Se han efectuado comparaciones entre las cantidades de P medidas usando carbón para recuperar el color y sin usarlo, y se ha encontrado

una diferencia de menos de 1 ppm P en cantidades extraídas inferiores a 20 ppm.

3.4.3 Método de extracción de fósforo por Bray 2 modificado

Se ha observado frecuentemente que cuando el suelo se fertiliza con cantidades bajas de fósforo (20-80 kg/ha de P), los procedimientos convencionales de laboratorio para la extracción de ese elemento no reflejan la variabilidad de su disponibilidad en el suelo. Como ejemplo de este hecho se puede mencionar el caso de un Oxisol de Carimagua, Colombia (Cuadro 3.2); se observa que los aumentos en el fósforo disponible extractado por el método convencional Bray II son muy pequeños frente a las dosis crecientes recibidas por el suelo.

Cuadro 3.2. Fósforo aplicado y fracciones de ese elemento extraídos de un Oxisol de Carimagua.

Aplicado (kg/ha)		Disponible Bray 2 (ppm)	Extraído (ppm)					
P ₂ O ₅	P		P-Ca	P-Al	P-Fe	Inor- gánico	Orgá- nico	Total
0	0	1.8	0.9	0.5	26	29.2	101	130.2
10	4.4	1.8	0.8	0.6	29	32.2	97	129.2
20	8.7	1.9	1.0	0.6	32	35.5	97	132.5
40	17.5	2.1	1.1	0.6	35	38.8	108	146.8
80	34.9	2.2	1.7	0.9	40	44.8	102	146.8
100	43.7	3.5	1.7	1.0	42	48.2	92	140.2
150	65.5	5.5	1.9	1.3	43	51.7	101	132.7
200	87.3	6.6	2.2	1.5	45	55.3	101	156.3

Fuente: CIAT (1981).

Bajo esas circunstancias es difícil ofrecer recomendaciones sobre fertilizantes fosforados con base solamente en pruebas analíticas de suelos; por esta razón se han iniciado algunos estudios para mejorar la sensibilidad de los procedimientos analíticos existentes para fósforo.

En la Figura 3.1, que ilustra los resultados preliminares de estudios realizados con Brachiaria decumbens, se observa que al aumentar las concentraciones de NH_4F en la solución extractora de Bray 2 también aumentan los valores del fósforo disponible, correlacionando bastante bien con el aumento en el rendimiento del pasto, en materia seca. Parece que el NH_4F es capaz de extraer parte del fósforo ligado al aluminio y al hierro.

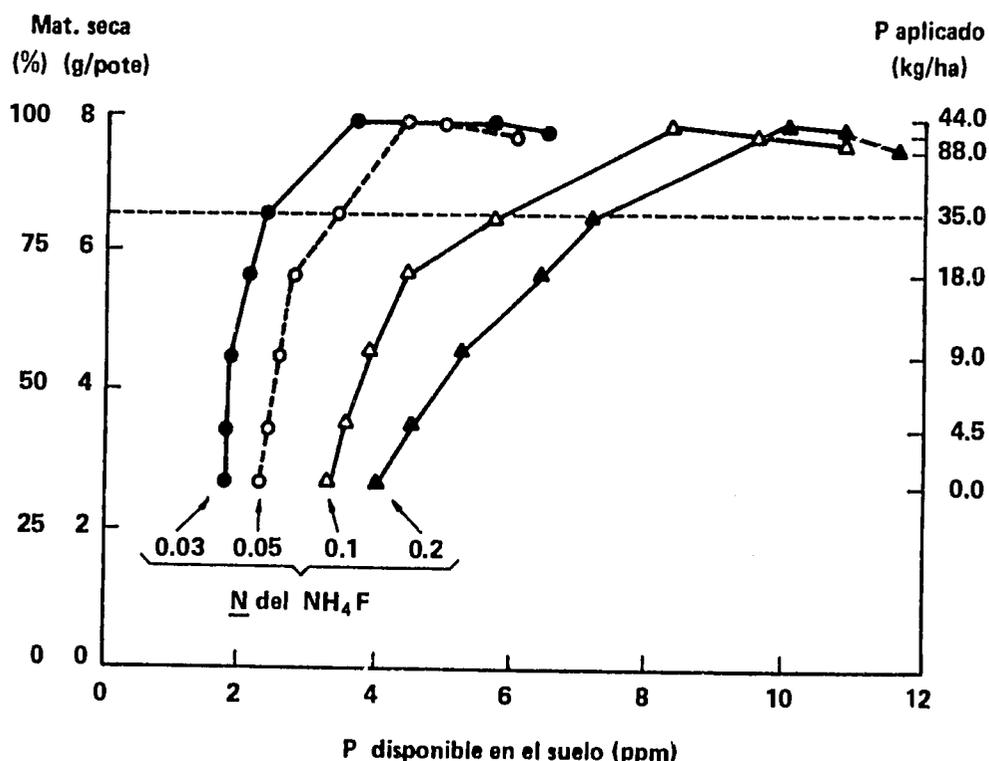


Figura 3.1 Producción de materia seca de Brachiaria decumbens, en función del nivel de P disponible en el suelo determinado con cuatro soluciones extractoras diferentes, en un Oxisol de Carimagua, Colombia. Cada solución consistía en una mezcla de HCl 0.1N y NH_4F de normalidad variable. CIAT (1981).

Estos resultados indican que el hierro y el aluminio pueden estar desempeñando una función importante en la liberación del fósforo haciéndolo disponible para las plantas, posiblemente como resultado de las secreciones radicales o de la actividad microbiana (micorriza). En consecuencia, parece lógico afirmar que las plantas que se desarrollan en condiciones de baja aplicación de fósforo, extraen este nutrimento de las fracciones de aluminio y hierro en una forma tal que las pruebas analíticas convencionales de suelos, usadas para medir disponibilidad de fósforo, no son capaces de detectar.

A continuación se explica un procedimiento que proponen los autores de este manual para aumentar la concentración de NH_4F en la solución extractora del método Bray 2.

Materiales:

Vasos de extracción de 50 ml, agitador, pipetas automáticas de 20 ml, papel de filtro de 11 cm de diámetro, frasco de plástico para la solución extractora, vasos de 1 lt para la solución de trabajo, dilutor automático, colorímetro con filtro de 660 m μ y probetas de 10 y 25 ml para las soluciones A y B para desarrollo de color.

Reactivos:

1. Solución extractora (HCl 0.1N + NH_4F 0.2N). Disolver 7.4 g de NH_4F y 16.64 ml de HCl 6N con agua doblemente deionizada o destilada y completar el volumen a 1 lt con agua doblemente deionizada.
2. Soluciones para desarrollo de color.
 - a) Las soluciones patrón A y B se preparan igual que en el método de Bray 2 (ver 3.4.1).
 - b) Solución de trabajo: Transferir 25 ml de la solución A a 800 ml de agua doblemente deionizada en un vaso de 1 lt y mezclar; añadir 10 ml de la solución B y después de mezclar bien, agregar 11.1 g de ácido bórico (H_3BO_3)*; disolver

* La interferencia del ion F se reduce por la adición de ácido bórico al 1% y es importante cuando la solución extractora del suelo contiene más de 0.05 M de NH_4F .

bien y luego completar el volumen a 1 lt, usando agua doblemente deionizada o destilada.

3. Solución estándar con fósforo, igual que en el método Bray 2.

Procedimiento:

1. Obtención del extracto de suelo
 - a) Pesar una muestra de 3 g de suelo y transferir a un vaso de extracción de 50 ml.
 - b) Añadir 20 ml de la solución extractora y un poco de carbón activado para evitar interferencias de color en el extracto; agitar durante 40 sg.
 - c) Filtrar la suspensión con papel de filtro Whatman no.42 o equivalente, hacia un vaso de 50 ml. El filtrado constituye el extracto de suelo.
2. Con la ayuda de un "dilutor dispensador" pasar simultáneamente 2 ml del extracto de suelo y 18 ml de la solución de trabajo a tubos de un colorímetro. Este procedimiento se repite con las soluciones estándar o patrón de fósforo; las concentraciones varían entre 0.05 y 1.0 ppm P.
3. Después de 30 minutos, leer los porcentajes de transmitancia (T) en un espectrofotómetro, usando una longitud de onda de 660 mμ.

Cálculos

Para conocer el P disponible en el suelo aplicar la fórmula:

$$P \text{ suelo (ppm)} = P \text{ muestra (ppm)} \times 66.7$$

en donde 66.7 = factor de dilución (FD), que se deriva de la siguiente manera:

$$FD: \frac{20 \text{ ml sln. extract.}}{1000 \text{ ml sln. extract.}} \times \frac{1000 \text{ g suelo}}{3 \text{ g suelo}} \times \frac{20 \text{ ml vol. final}}{2 \text{ ml extracto}} = 66.7$$

3.5 Determinación de la Acidez Intercambiable y los Cationes Cambiables en Suelos con pH Menor que 5.4

En suelos con pH inferior a 5.4, con carga variable en función del pH, que no sean calcáreos ni salinos, estas determinaciones se hacen en un extracto de suelo a base de KCl*.

3.5.1 Obtención del extracto del suelo

Todas las determinaciones de cationes, a excepción del K, se hacen en un extracto de suelo preparado así:

Materiales:

Vasos de extracción de 50 ml, agitador de muestras, balones volumétricos de 100 ml, dispensador de 10 ml, frascos para la solución extractora, pipeta automática de 50 ml y embudos de plástico o de vidrio.

Reactivos y su preparación:

1. Solución extractora de KCl 1N: pesar 74.56 g de cloruro de potasio y disolverlo en aproximadamente 500 ml de agua doblemente deionizada o destilada; completar volumen a 1 lt.

Procedimiento:

1. Pesar 10 g de suelo seco al aire y añadir 50 ml de KCl 1N.
2. Agitar durante 30 mn y filtrar a un balón volumétrico de 100 ml. Lavar el suelo con KCl 1N, usando cinco porciones de la solución, de 10 ml cada una. Finalizada la filtración, completar el volumen a 100 ml con KCl 1N y agitar para obtener una mezcla homogénea.

* Lin y Coleman (1960); Pratt y Bair (1961); Coleman y Thomas (1967).

3.5.2 Acidez intercambiable (Al + H)

Materiales:

Erlenmeyers de 125 ml, pipeta volumétrica de 50 ml, bureta con frasco para NaOH; frasco gotero para la solución de fenolftaleína.

Reactivos y su preparación:

1. Metil naranja 0.1% (indicador). Pesar 0.1 g de este producto y disolverlo en un poco de agua destilada; agregar más agua destilada para completar el volumen a 100 ml.
2. Fenolftaleína 1% (indicador). Pesar 1 g de la fenolftaleína y disolver en 70 ml de alcohol etílico; completar luego con el alcohol etílico el volumen a 100 ml.
3. Solución de NaOH 0.05N. Prepararla a partir de una solución de NaOH 0.1N, tomando 500 ml de esta solución y completando su volumen hasta 1 lt, con agua doblemente deionizada o destilada.

Procedimiento:

1. Acidez intercambiable (Al + H).
 - a) Transferir a un Erlenmeyer de 125 ml de capacidad, 50 ml del extracto de suelo obtenido con KCl 1N, agregar tres gotas de fenolftaleína al 1%.
 - b) Titular con NaOH 0.05N hasta cuando aparezca un color rosado pálido permanente; anotar el volumen de NaOH (ml) empleado en la titulación.
2. Hidrógeno intercambiable:
 - a) Transferir a un Erlenmeyer de 125 ml de capacidad 50 ml del extracto obtenido con KCl 1N; agregar tres gotas del indicador metil naranja al 0.1%.
 - b) Titular con NaOH 0.05N hasta cuando aparezca un color amarillo permanente en la solución; anotar el volumen de NaOH (ml) empleado en la titulación.
3. Al intercambiable = acidez intercambiable - H intercambiable

Cálculos:

Tanto la acidez intercambiable como el hidrógeno intercambiable, expresados en miliequivalentes/100 g, suelo se calculan así:

Acidez (meq/100 g suelo)

$$= \text{ml NaOH} \times \underline{N} \text{ NaOH} \times \frac{100 \text{ g suelo}}{\text{peso suelo (g)}} \times \frac{100 \text{ ml extracto}}{50 \text{ ml extracto}}$$

$$= \text{ml NaOH} \times 0.05 \times \frac{100 \text{ g suelo}}{10 \text{ g suelo}} \times \frac{100 \text{ ml extracto}}{50 \text{ ml extracto}}$$

$$= \text{ml NaOH} \times 1$$

3.5.3 Calcio (Ca)

Reactivos y su preparación:

1. Solución de sodio para evitar interferencia en los extractos al usar el espectrofotómetro. Prepararla así:
 Pesar 50.84 g de NaCl y disolver completamente en 200 ml de agua doblemente deionizada o destilada; completar el volumen a 1 lt para obtener una concentración de 20,000 ppm Na. Tomar 60 ml de esta solución y diluir hasta completar 1 lt.

Procedimiento

1. Tomar 2 ml del extracto de suelo (en KCl 1N) y diluir con una solución de NaCl hasta un volumen de 20 ml.
2. Preparar soluciones estándar de Ca de 0, 0.4, 1.0, 3.0 y 5.0 ppm Ca para usar en la curva patrón. Prepararlas así:
 - a) De una solución de 1000 ppm Ca (preparada comercialmente) tomar 0, 1.0, 2.5, 7.5 y 12.5 ml y diluir a 250 ml con agua doblemente deionizada o destilada, para obtener estándares de 0, 4, 10, 30 y 50 ppm Ca.
 - b) Al momento de utilizar las soluciones en el espectrofotómetro de absorción atómica, diluirlas nuevamente; se toman 2 ml de cada una de ellas y se llevan a un volumen final de 20 ml agregando la solución de NaCl.
3. Usando la llama de óxido nitroso acetileno y los estándares de Ca, leer en un espectrofotómetro de absorción atómica la transmitancia del extracto diluido.

Cálculos

La cantidad de Ca en el suelo se determina así:

$$\text{Ca suelo (meq/100 g)} = \text{Ca muestra (ppm)} \times 0.5$$

donde: 0.5 es el factor de dilución (FD), el cual se calcula así:

$$FD = \frac{100\text{ml sol. extr.} \times 100\text{g suelo} \times 20\text{ml vol. fin.} \times 1\text{meq Ca}}{1000\text{ml sol. extr.} \times 10\text{g suelo} \times 2\text{ml extracto} \times 20\text{mg Ca}} = 0.5$$

3.5.4 Magnesio (Mg)Procedimiento:

1. Usar la misma dilución del extracto de suelo en KCl 1N indicada para la determinación de calcio.
2. Preparar estándares de magnesio de 0, 0.2, 0.5 y 1.5 ppm Mg para calibrar el equipo y obtener la curva patrón de Mg, así:
 - a) De una solución de 500 ppm de Mg preparada comercialmente, tomar 0, 1, 2.5 y 7.5 ml y llevar a un volumen de 250 ml con agua doblemente deionizada o destilada.
 - b) Para utilizar las soluciones obtenidas (0, 2, 5 y 15 ppm Mg) se deben diluir nuevamente tomando 2 ml de cada una de ellas y completando su volumen a 20 ml, con la solución de NaCl.
3. Usando la llama aire-acetileno y la curva calibrada para Mg, leer directamente la transmitancia en un espectrofotómetro de absorción atómica.

Cálculos

La cantidad de magnesio se calcula así:

$$\text{Mg suelo (meq/100 g)} = \text{Mg muestra (ppm)} \times 0.83$$

donde 0.83 es el factor de dilución (FD) que se calcula así:

$$FD = \frac{100\text{ml sln. extr.} \times 100\text{g suelo} \times 20\text{ml vol. fin.} \times 1\text{meq Mg}}{1000\text{ml sln. ext.} \times 10\text{g suelo} \times 2\text{ml extracto} \times 12\text{mg Mg}} = 0.83$$

3.5.5 Manganeso (Mn)

Procedimiento:

1. Utilizar el extracto de KCl 1N.
2. A partir de una solución de 1000 ppm Mn preparada comercialmente, preparar estándares con concentraciones de 0.0, 1.0, 2.0, 4.0, 6.0, 10.0 y 20.0 ppm, diluyendo en agua doblemente deionizada o destilada alícuotas de 0.0, 0.25, 0.50, 1.00, 1.50, 2.50 y 5.00 ml, hasta completar volúmenes de 250 ml.
3. Usando los estándares obtenidos, leer directamente la transmitancia en un espectrofotómetro de absorción atómica; en este caso se emplea la llama aire-acetileno.

Cálculos

La cantidad de manganeso se calcula así:

$$\text{Mn suelo (ppm)} = \text{Mn muestra (ppm)} \times 10$$

en donde 10 es el factor de dilución FD que se calcula así:

$$\text{FD} = \frac{100\text{ml sol. extr.}}{1000\text{ml sol. extr.}} \times \frac{1000 \text{ g suelo}}{10 \text{ g suelo}} = 10$$

3.5.6 Determinación de potasio (K) con solución extractora de NH₄Cl 1N

Materiales:

Erlenmeyer de 125 ml, agitador de muestras, dispensador de 50 ml, frasco para la solución extractora, embudos de plástico o de vidrio y papel de filtro de 11 cm de diámetro.

Reactivos y su preparación:

Solución extractora de NH₄Cl 1N. Pesar 53.49 g de NH₄Cl, disolver en aproximadamente 500 ml de agua doblemente deionizada o destilada y completar el volumen a 1 lt.

Procedimiento:

1. Preparación del extracto del suelo:
 - a) Pesar 2.5 g de suelo seco al aire y tamizado en malla no. 10 (2 mm) y agregar 50 ml de la solución extractora.
 - b) Agitar durante 30 min y filtrar. Este filtrado constituye el extracto del suelo.
2. Preparación de los estándares de potasio:
 - a) Pesar 1.9069 g de KCl seco, disolver y completar el volumen a 1 lt, usando agua deionizada o destilada. Esta solución contiene 1000 ppm de K.
 - b) A partir de esa solución preparar soluciones estándar diluyendo con agua doblemente deionizada alícuotas de 0.0, 0.5, 1.0, 2.5, 5.0 y 10.0 ml hasta completar volúmenes de 250 ml; las concentraciones finales serán de 0.0, 2.0, 4.0, 10.0, 20.0 y 40.0 ppm de K.
3. Usando una curva calibrada de potasio con los estándares preparados, leer directamente la transmitancia en un espectrofotómetro de absorción atómica; se emplea la llama de aire-acetileno.

Cálculos

El K intercambiable se calcula así:

$$K \text{ suelo (meq/100g suelo)} = K \text{ muestra (ppm)} \times 0.051$$

donde, 0.051 es el factor de dilución (FD), el cual se calcula así:

$$FD = \frac{50 \text{ ml sln. extract.} \times 100 \text{ g suelo} \times 1 \text{ meq K}}{1000 \text{ ml sln. extr.} \times 2.5 \text{ g suelo} \times 39 \text{ mg K}} = 0.051$$

3.5.7 Determinación de potasio con extractor de Bray 2

Para determinar el potasio también se puede usar un extracto de suelo preparado de manera idéntica al que se utiliza para la determinación de fósforo (sección 3.4.1), y utilizando los mismos estándares de K que en el método anterior (3.5.6) para la lectura en el espectrofotómetro de absorción atómica.

El contenido de potasio en el suelo se calcula así:

$$K \text{ suelo (meq/100g suelo)} = K \text{ muestra (ppm)} \times 0.018$$

en donde, 0.018 es el factor de dilución (FD), el cual se calcula así:

$$FD = \frac{20\text{ml sol.extract.}}{1000\text{ml sol.extr.}} \times \frac{100\text{g suelo}}{2.85\text{g suelo}} \times \frac{1 \text{ meq K}}{39\text{mg. K}} = 0.018$$

Al comparar los resultados obtenidos con los dos extractos (NH_4Cl 1N y Bray 2) se observa que ambos procedimientos extraen la misma cantidad de potasio intercambiable.

3.5.8 Parámetros derivados

Como resultado de las determinaciones anteriormente descritas en esta sección (3.5), es posible determinar la capacidad de intercambio catiónico efectivo (CICE) y el porcentaje de saturación de aluminio, usando una sal no amortiguada de KCl.

3.5.8.1 Capacidad de intercambio catiónico efectivo (CICE). Para suelos con pH inferior a 5.5 y con carga variable en función del pH, no calcáreos ni salinos, la medida que determina más exactamente la carga total es el desplazamiento de cationes por una sal no amortiguada como el KCl. La suma de los cationes desplazados se ha denominado "capacidad de intercambio catiónico efectivo, CICE" (Coleman y Thomas, 1967).

$$CICE = Al + Ca + Mg + K$$

No es conveniente aquí usar los métodos que se usan corrientemente en otros suelos para medir la capacidad de intercambio catiónico (CIC), porque en este caso sobreestiman ese valor. Todos esos métodos se refieren a la cantidad de cationes que pueden absorber soluciones salinas amortiguadas con acetato de amonio (NH_4OAc) a un

pH 7, o con cloruro de bariotrietanolamina (Ba-TEA) a un pH 8.2; sirven, por lo tanto, para determinar el CIC en suelos con pH 7.0 a 8.2, que tengan poca o ninguna carga variable; también se pueden usar satisfactoriamente en suelos ácidos que tengan sistemas de capas silicatadas y cuya carga no sea dependiente del pH, como ocurre en suelos montmorilloníticos, bajos en materia orgánica.

En general, valores de CICE superiores a 4 meq/100 g en suelos ácidos sugieren suficiente CIC para prevenir considerables pérdidas por lixiviación de cationes (Sánchez, 1976).

3.5.8.2 Porcentaje de saturación de aluminio. El porcentaje de saturación de aluminio, una medida útil de la acidez del suelo, es una relación entre el aluminio intercambiable extraído por una sal no amortiguada de KCl y la suma de las bases cambiables más el aluminio intercambiable.

$$\text{Saturación de Al (\%)} = \frac{\text{Al}}{\text{Al} + \text{Ca} + \text{Mg} + \text{K}} \times 100$$

3.6 Cationes Cambiables en Suelos con pH 5.6-7.0, con Carga no Dependiente del pH

La determinación de cationes cambiables en suelos ligeramente ácidos a neutros que no sean calcáreos ni salinos*, se hace usando acetato de amonio para obtener el extracto del suelo.

* Peech et al. (1957), Chapman (1965).

3.6.1 Obtención del extracto del suelo

Materiales:

Erlenmeyers de 125 ml, bureta automática de 25 ml, frascos volumétricos de 100 ml, papel de filtro de 5.5 cm de diámetro, embudos Buchner de 6 cm de diámetro, gradilla para succionar, bomba de succión y frasco para solución extractora.

Reactivos y su preparación:

1. Acetato de amonio 1N, pH 7. Pesar 77.08 g de acetato de amonio y disolver por completo en 500 ml de agua doblemente deionizada o destilada y completar el volumen a 1 lt.
2. Solución de sodio. Pesar 50.84 g de cloruro de sodio, disolverlos por completo en 200 ml de agua doblemente deionizada o destilada y completar el volumen a 1 lt; así se obtiene una solución con 20.000 ppm de Na, de la cual se toman 60 ml y se diluyen a 1 litro. Esta última solución se utiliza para diluir las muestras y evitar interferencia en los extractos al usar espectrofotometría de absorción atómica.

Procedimiento:

1. Pesar 5 g de suelo y en un Erlenmeyer de 125 ml agregarles 25 ml de la solución de acetato de amonio 1N. Agitar durante 30 min, dejar en reposo 15 mn y filtrar usando succión.
2. Recibir el filtrado en un balón volumétrico de 100 ml, lavando el suelo con pequeñas porciones de la solución de acetato de amonio. Después de terminada la filtración, completar el volumen a 100 ml y agitar.

Este filtrado constituye el extracto de suelo a partir del cual se determinan los cationes cambiabiles (Ca, Mg y K).

3.6.2 Determinaciones de calcio (Ca), magnesio (Mg) y potasio (K)

3.6.2.1. Procedimiento general. a) Por medio de una pipeta o de un "dilutor dispensador", tomar 2 ml de filtrado (extracto de suelo) y 18 ml de la solución de sodio. b) Preparar los estándares para cada catión en forma similar a la expuesta para el caso de suelos muy ácidos (3.5), y leer la transmitancia en el espectrofotómetro de absorción atómica.

3.6.2.2. Determinación de calcio. Se usa la llama óxido nitroso-acetileno y estándares cuya mayor concentración no exceda 5 ppm de Ca. La disponibilidad se calcula así:

$$\text{Ca suelo (meq/100g suelo)} = \text{Ca muestra (ppm)} \times 1$$

donde, 1 es el factor de dilución (FD), el cual se calcula así:

$$\text{FD} = \frac{100\text{ml sln.ex.} \times 100\text{g suelo} \times 20\text{ml sol.fin.} \times 1\text{meq Ca}}{1000\text{ml sln.ex.} \times 5\text{g suelo} \times 2\text{ml extr.} \times 20\text{mg Ca}} = 1$$

3.6.2.3. Determinación de magnesio. Leer la transmitancia en un espectrofotómetro de absorción atómica, usando la llama de aire-acetileno y estándares de magnesio que hayan recibido el mismo tratamiento que las muestras, y cuya concentración más alta no exceda de 1.5 ppm de Mg.

La disponibilidad de magnesio en el suelo se calcula con la siguiente fórmula:

$$\text{Mg suelo (meq/100 g suelo)} = \text{Mg muestra (ppm)} \times 1.67$$

donde, 1.67 es el factor de dilución (FD), el cual se calcula así:

$$\text{FD} = \frac{100\text{ml sln.extr.} \times 100\text{g suelo} \times 20\text{ml vol.fin.} \times 1\text{meq Mg}}{1000\text{ml sln.extr.} \times 5\text{g suelo} \times 2\text{ml extracto} \times 12\text{mg Mg}} = 1.67$$

3.6.2.4. Determinación de potasio. Se usan la llama de aire-acetileno y estándares que cubran un rango entre 0 y 40 ppm de K, para leer directamente en el espectrofotómetro de absorción atómica el contenido de ese elemento en la solución.

El contenido de potasio en el suelo se calcula así:

$$K \text{ suelo (meq/100 g suelo)} = K \text{ muestra (ppm)} \times 0.051$$

donde, 0.051 es el factor de dilución (FD), el cual se calcula así:

$$FD = \frac{100\text{ml sln.extr.} \times 100\text{g suelo} \times 1\text{meq K}}{1000\text{ml sln.extr} \times 5\text{g suelo} \times 39\text{mg K}} = 0.051$$

3.6.3 Determinación de sodio (Na)

Procedimiento:

1. Usar el mismo extracto empleado en la determinación de calcio, magnesio y potasio, pero sin diluir con la solución de NaCl.
2. Preparar los estándares de sodio así:
 - a) Obtener una solución de 1000 ppm de Na, pesando 2.542 g de NaCl y diluyendo en 1 lit de agua deionizada o destilada. El NaCl se debe secar previamente en una estufa a 110°C durante varias horas.
 - b) De la solución anterior preparar estándares cuyas concentraciones finales sean 1, 2, 5, 10 y 20 ppm de Na; para el efecto se deben diluir alícuotas de 0, 0.25, 0.5, 1.25, 2.5 y 5.0 ml de la solución en agua doblemente deionizada o destilada a un volumen final de 250 ml.
3. Usando los estándares preparados y la llama de aire-acetileno, leer directamente en el espectrofotómetro la concentración de sodio en la solución.

Cálculos

El contenido de sodio en el suelo se calcula así:

$$\text{Na suelo (meq/100 g suelo)} = \text{Na muestra (ppm)} \times 0.087$$

donde, 0.087 es el factor de dilución FD, el cual se obtiene así:

$$FD = \frac{100\text{ml sln.extr.}}{1000\text{ml sln.extr.}} \times \frac{100\text{g suelo}}{5\text{g suelo}} \times \frac{1\text{meq Na}}{23\text{mg Na}} = 0.087$$

3.7 Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC) en Suelos con pH 5.4-7.0 y Carga no Dependiente del pH

Para suelos de estas características, que además no sean calcáreos ni salinos, la determinación del CIC se hace usando el suelo que queda en el embudo después de obtener el extracto para determinar cationes cambiables.

Materiales:

Erlenmeyers de 125 ml, dispensador de 10 ml y buretas con frascos.

Reactivos:

1. Alcohol etílico del 96%.
2. Solución de NaCl 10%.
3. Solución de formaldehído, 38%.
4. Solución de fenolftaleína, 1%.
5. Solución de NaOH, 0.1N.

Procedimiento:

1. Lavar, con cinco porciones de alcohol etílico del 96%, el suelo que queda en el embudo después de obtener el extracto de acetato de amonio para determinar cationes cambiables. Desechar el alcohol utilizado en el lavado.

2. Sacar el amonio intercambiable del suelo mediante cinco lavados con una solución de NaCl al 10%, recogiendo el líquido en Erlenmeyers de 125 ml.
3. Finalizada la filtración, agregar al filtrado 10 ml de la solución de formaldehído y tres gotas de fenolftaleína; titular con NaOH 0.1N hasta obtener un color rosado pálido permanente.

Cálculos:

La capacidad de intercambio catiónico (CIC) se obtiene así:

$$\text{CIC} = \text{ml NaOH} \times \text{Normalidad NaOH} \times \frac{100\text{g suelo}}{5\text{g suelo}}$$

3.8 Determinación de Azufre*

3.8.1 Obtención del extracto de suelo

Materiales:

Erlenmeyer de 125 ml, bureta automática de 50 ml, agitador, papel de filtro de 15 cm de diámetro Whatman no. 42 o equivalente, balanza, embudos de plástico o de vidrio y garrafa de plástico para la solución extractora.

1972), The Sulphur Institute - Tec. Bull. 14 (1968).

Reactivos y su preparación:

Fosfato de calcio ($\text{Ca}[\text{H}_2\text{PO}_4]_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$) para la solución extractora. Disolver 2.02 g del fosfato en 1 lt de agua deionizada o destilada. La solución tiene una concentración de 0.008M.

* Referencias: Fox et al. (1964), Ensminger (1954), Bartlett y Weller (1960); Massoumi y Cornfield (1963), Tabatabai y Bremner (1972), The Sulphur Institute - Tec. Bull. 14 (1968).

Nota: Fox y colaboradores (1964) recomiendan usar fosfato de calcio en suelos con contenidos altos de materia orgánica, porque eso elimina el problema de la turbidez del extracto; así, el anión fosfato desplaza el anión sulfato adsorbido y el catión calcio evita la extracción de materia orgánica del suelo y elimina la contaminación que proviene del azufre orgánico.

3.8.2 Método turbidimétrico para determinar azufre en el extracto

Para la determinación de azufre en el suelo se sigue un procedimiento de turbidimetría.

Materiales:

Colorímetro, tubos colorimétricos y pipetas de 1, 2, 2.5 y 10 ml.

Reactivos y su preparación:

1. Solución semilla: pesar 0.1135 g de K_2SO_4 (seco en la estufa a $60^\circ C$) y disolver en 100 ml de agua deionizada; agregar 49.67 ml de HCl 12.08N y diluir luego a 250 ml con agua deionizada. La concentración final del HCl es 2.4N.
2. Gelatina - Cloruro de Bario. En 400 ml de agua caliente ($60-70^\circ C$), disolver 0.3 g de gelatina (Difco Bacto Galatin - DIFCO Laboratorios Inc Detroit Mich.) ó 4 g de goma arábica de grado "reactivo químico"; enfriar la solución con agitación constante. Agregar luego 50 g de cloruro de bario ($BaCl_2 \cdot H_2O$) grado reactivo y agitar la mezcla hasta cuando el cloruro de bario esté disuelto.
3. Sulfato de potasio (K_2SO_4) grado reactivo.
4. Solución extractora a base de fosfato de calcio.

Procedimiento:

1. Tomar 10 ml del extracto de suelo.

2. Agregar 2 ml de la solución semilla. Por cada 2 ml de esta solución hay 0.5 mg de S.
3. Agregar 4 ml de la mezcla de gelatina o goma arábiga con cloruro de bario y agitar bien hasta cuando la muestra esté bien homogénea.
4. Dejar en reposo por 20 min , agitar de nuevo y 10 mn después leer el porcentaje de transmitancia en un colorímetro a 420 mu. Calcular el contenido de S en la alícuota analizada, haciendo referencia a una curva calibrada con soluciones estándar como se indica a continuación.

Preparación de estándares de azufre:

1. Disolver 5.43 g de sulfato de potasio (K_2SO_4) grado reactivo en agua deionizada o destilada y diluir la solución a 1 lt. Esta solución contiene 1000 ppm de S.
2. A partir de la solución anterior preparar una de 80 ppm de S, pipeteando 8 ml y llevando a un volumen de 100 ml con agua deionizada o destilada. Con esta solución de 80 ppm de S se preparan las soluciones estándar para la curva patrón como se indica en el Cuadro 3.3.
3. Tomar 10 ml de cada una de estas soluciones y seguir el procedimiento de la misma manera que para las muestras; las concentraciones finales de estas soluciones son de 0, 1.6, 3.2, 6.4, 9.6, 12.8 y 16.0 ppm de S.

Cálculos

Aplicar la siguiente fórmula:

$$S \text{ suelo (ppm)} = S \text{ muestra (ppm)} \times 5$$

en donde, 5 es el factor de dilución (FD), que se obtiene así:

$$FD = \frac{50\text{ml sln.extract.}}{1000\text{ml sln.extr.}} \times \frac{1000\text{g suelo}}{10\text{g suelo}} = 5$$

Cuadro 3.3. Preparación de las soluciones para la curva patrón de S, y concentración final.

Volumen de la Solución estándar (ml)	Volumen de la Solución Extractora (ml)	Concentración final de S en 100 ml. (ppm)
0	100	0.0
2	98	1.6
4	96	3.2
8	92	6.4
12	88	9.6
16	84	12.8
20	80	16.0

3.9 Determinación de Micronutrientes y Manganeseo

3.9.1 Boro (B)*

Materiales:

Espectrofotómetro, bureta de 500 ml, pipeta de 1 ml, vaso de plástico de 250 ml, frascos de plástico de 50 ml, bureta de 50 ml, plancha caliente, balanza, bomba de succión, embudos Buchner de 5.5 cm de diámetro, papel de filtro de 5.5 cm de diámetro.

Todo el material de vidrio debe estar libre de boro o tener un bajo contenido de este elemento.

Reactivos y su preparación:

1. Solución buffer. Pesar 100g de acetato de amonio ($\text{CH}_3\text{COONH}_4$); agregar 50 ml de ácido acético (CH_3COOH) y 2.68 g de sal

* Dible et al. (1954), Wear (1965).

disódica EDTA* (Ethylenediamine tetra acético ácido). Agregar 2.4 ml de ácido tioglicólico del 98% ($\text{HS-CH}_2\text{-COOH}$) y completar con agua deionizada hasta un volumen de 160 ml; agitar hasta cuando todo esté bien disuelto.

Preparar esta solución cada semana en botella de polietileno.

2. Reactivo de color**. Prepararlo diariamente, pesando 0.9 g de Azometina H y 2 g de ácido ascórbico ($\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_6$) y disolviendo en 100 ml de agua deionizada o destilada.

Procedimiento:

1. Pesar 10 g de suelo en un vaso de vidrio de 250 ml que esté libre de boro y agregar 20 ml de agua doblemente deionizada o destilada.
2. Pesar el vaso y su contenido y dejarlo sobre la plancha caliente por 5 min exactos, desde el momento en que aparezca el primer hervor.
3. Pesar nuevamente y reponer el agua perdida por la evaporación. Dejar enfriar y filtrar. El filtrado constituye el extracto.
4. Tomar 2 ml del extracto en tubos de plástico de 25 ml y agregar 4 ml de la solución buffer y 2 ml del reactivo de color (Azometine H). Agitar y esperar.
5. Pasados 45 mn hacer la lectura en el espectrofotómetro, usando estándares de boro entre 0.2 y 3 mg/lt, preparados así:
 - a) Pesar 0.572 g de ácido bórico (H_3BO_3); con agua doblemente deionizada o destilada, disolver el ácido y completar el volumen a 1 lt. Esta solución contiene 100 ppm de B.
 - b) Tomar de la solución anterior 10 ml y completar el volumen de 100 ml, usando agua doblemente deionizada o destilada para obtener una concentración de 10 ppm de B.
 - c) Tomar de la última solución alícuotas de 1, 2, 4, 6, 8, 10 y 15 ml, llevar a balones de 50 ml y diluir con agua doblemente deionizada o destilada para obtener concentraciones de 0.2, 0.4, 0.8, 1.2, 1.6, 2.0 y 3.0 mg/lt.

* Atrapa los iones que interfieren en el desarrollo del color, como son el cobre y el aluminio.

** Powell, G. y G.A. Mitchell (1979).

- d) Tomar de las últimas soluciones 2 ml y continuar con el mismo procedimiento indicado para la muestra de suelo. El estándar cero se debe hacer por duplicado, como control para el laboratorio.

Cálculos:

El contenido de boro se calcula así:

$$\text{Boro suelo (ppm)} = B \text{ muestra (ppm)} \times 2$$

en donde, 2 es el factor de dilución (FD), obtenido así:

$$FD = \frac{20 \text{ ml sln. extract.} \times 1000 \text{ g suelo}}{1000 \text{ ml sln. extr.} \quad 10 \text{ g suelo}} = 2$$

3.9.2 Zinc (Zn), cobre (Cu), hierro (Fe), manganeso (Mn)*

Materiales:

Vasos de extracción de 50 ml, agitador, pipeta automática de 20 ml, papel de filtro de 11 cm de diámetro (Whatman no.42 o equivalente) y frasco de vidrio para solución extractora.

Reactivo y su preparación

Solución extractora de HCl 0.05N + H₂SO₄ 0.025N. Mezclar cuidadosamente 50 ml de HCl 1N y 2.5 ml de H₂SO₄ 10N; completar luego al volumen de 1 lt, con agua doblemente deionizada o destilada.

Procedimiento:

1. Pesar 5 g de suelo seco al aire y tamizado con malla no.10 (2 mm) y transferir a un vaso de 50 ml; añadir 20 ml de la solución extractora. La relación suelo-extractante es de 1:4.
2. Agitar por 15 minutos y filtrar usando papel de filtro Whatman no.42, o equivalente.
3. Leer directamente en un espectrofotómetro de absorción atómica la

* Olsen y Dean (1965), Nelson et al. (1953) y Jackson (1964).

concentración de cada uno de los elementos menores en el extracto obtenido, utilizando las respectivas soluciones estándar.

Para preparar esas soluciones estándar se emplean soluciones concentradas (1000 ppm de cada elemento) preparadas comercialmente, tomando alícuotas y diluyéndolas como se indica en el Cuadro 3.4.

Cuadro 3.4. Cantidades requeridas de solución de 1000 ppm de micronutrientes y volúmenes de dilución para obtener las respectivas soluciones estándar.

Solución 1000 ppm (ml) ^a	Cu y Zn		Solución 1000 ppm (ml) ^a	Fe y Mn	
	Volumen final (ml)	Concentra- ción soluc. estándar (ppm)		Volumen final (ml)	Concentra- ción soluc. estándar (ppm)
0.00	250	0.0	0.00	250	0.0
0.25	500	0.5	0.25	250	1.0
0.25	250	1.0	0.50	250	2.0
0.50	250	2.0	1.00	250	4.0
1.00	250	4.0	1.50	250	6.0
			2.50	250	10.0
			5.00	250	20.0

^a Las cantidades de solución estándar indicadas para los cuatro nutrientes, pueden ir juntas.

Cálculos

El contenido de cada elemento en el suelo está dado por la fórmula:

$$\text{Zn, Cu, Fe o Mn suelo (ppm)} = \text{Zn, Cu, Fe o Mn muestra (ppm)} \times 4$$

en donde, 4 es el factor de dilución (FD) el cual se calcula así:

$$\text{FD} = \frac{20\text{ml sol.extract.}}{1000\text{ml sol.extr.}} \times \frac{1000\text{g suelo}}{5\text{g suelo}} = 4$$

4. METODOLOGIA PARA EL ANALISIS QUIMICO DE PLANTAS FORRAJERAS

4.1 Determinación de Nitrógeno*

Materiales:

Tubos de digestión, bloques de digestión a 370°C, microdestilador, bureta con frasco de 50 ml y Erlenmeyers de 125 ml.

Reactivos y su preparación:

1. Hidróxido de sodio al 50%.
2. Indicador mixto: Pesar 0.5 g del indicador verde bromocresol y 0.1 g del indicador rojo de metilo; diluir en 100 ml de alcohol etílico del 96%.
3. Solución de ácido bórico al 4%. Por cada litro de esta solución agregar 5 ml de la solución de indicador mixto.
4. HCl 0.02N. Preparar a partir de HCl 1N tomando 20 ml y diluyendo con agua doblemente deionizada o destilada a 1 lt.
5. Acido sulfúrico concentrado.
6. Catalizador. Mezclar 0.5 g de selenio y 100 g de Na_2SO_4 hasta que queden bien compactos.

Procedimiento:

1. Pesar y colocar 0.1 g de muestra en un tubo de digestión y agregar una porción del catalizador.
2. Agregar 4 ml de ácido sulfúrico concentrado y digerir en bloques a 370°C durante 30 min.
3. Dejar enfriar y agregar un poco de agua deionizada. Pasar cuantitativamente el contenido del tubo a un microdestilador, enjuagando con agua deionizada o destilada.
4. Agregar 20 ml de la solución de hidróxido de sodio al 50% y destilar, recibiendo el destilado en una solución de ácido bórico al 4%.
5. Titular el destilado con HCl 0.02N hasta obtener un color gris claro.

* Bremer (1965).

6. Preparar y titular un control que contenga todos los reactivos menos la muestra; el volumen gastado (ml) en la titulación de este control se debe tomar en cuenta para restarlo de las muestras, en los cálculos.

Cálculos:

$$N (\%) = V - B \times 0.02 \times 0.014 \times \frac{100}{0.1}$$

donde:

- V = ml gastados de HCl 0.02N en la muestra
 B = ml gastados de HCl 0.02N en el control
 0.02 = normalidad de HCL
 0.014 = peso equivalente del N
 100 = relación porcentual
 0.1 = peso de la muestra.

4.2 Determinación de Fósforo, Potasio, Calcio, Magnesio, Azufre y Aluminio

4.2.1 Obtención del extracto de tejido vegetal

Este extracto resulta de la digestión de la muestra y se obtiene así:

Materiales:

Tubos graduados de digestión Taylor de 50 ml, bureta con frasco y plancha caliente ubicada en campana con extractor para ácido perclórico.

Reactivos y su preparación:

1. Acido nítrico (65% analítico, grado reactivo).
2. Acido perclórico (70%) analítico, grado reactivo.
3. Acido clorhídrico 6N: Tomar 500 ml de HCl concentrado y diluir a 1 lt con agua doblemente deionizada o destilada.

Procedimiento:

1. Pesar 0.25 g de tejido vegetal molido y seco en estufa (a 65°C por 24 horas) y colocar en un tubo de digestión Taylor.
2. Agregar 3 ml de ácido nítrico (HNO₃) y calentar a baja temperatura (150°C) en una plancha durante 30 min. Dejar enfriar durante 15 min.
3. Agregar 2 ml de ácido perclórico y continuar el calentamiento a alta temperatura (220°C) durante 1 h o más, hasta cuando aparezcan humos blancos y se obtenga un líquido blanco.
4. Dejar enfriar y agregar 3 ml de HCl 6N. Completar el volumen a 50 ml con agua doblemente deionizada o destilada y agitar completamente.

La solución obtenida constituye el extracto del tejido vegetal en el cual se determinan los elementos P, K, Ca, Mg, S y Al.

4.2.2 Fósforo (P), calcio (Ca) y magnesio (Mg)

Se determinan en forma similar a la indicada para el suelo, y los cálculos se hacen en términos de porcentaje, así:

$$P \text{ tejido (\%)} = P \text{ muestra (ppm)} \times FD$$

$$Ca \text{ tejido (\%)} = Ca \text{ muestra (ppm)} \times FD$$

$$Mg \text{ tejido (\%)} = Mg \text{ muestra (ppm)} \times FD$$

En estos casos el factor de dilución FD es 0.2 y se calcula así:

$$FD = \frac{50 \text{ ml sln. extr.} \times 20 \text{ ml vol. fin.} \times 1 \text{ g} \times 100 \text{ g tej. veg.}}{1000 \text{ ml sln. ext.} \times 2 \text{ ml extracto} \times 1000 \text{ mg} \times 0.25 \text{ g tej. veg.}} = 0.2$$

4.2.3 Potasio (K)

Procedimiento

1. Usar el extracto de tejido indicado en 4.2.1 y el espectrofotómetro de absorción atómica con la llama de aire-acetileno.
2. Preparar estándares de potasio para la lectura correspondiente, así:
 - a) Tomar 10 g de cloruro de potasio (KCl) y secar en estufa a 105°C durante 1 h.
 - b) Una vez seco y frío el KCl, pesar 1.91 g, disolver y diluir a 1 lt para obtener una solución de 1000 ppm de K.
 - c) Tomar de esa solución alícuotas de 0.0, 2.5, 5.0, 10, 15, 20 y 30 ml, diluyendo en 250 ml de agua doblemente deionizada o destilada. Las concentraciones finales serán de 0, 10, 20, 40, 60, 80 y 120 ppm de K, respectivamente.

Cálculos:

Se hacen aplicando la fórmula:

$$K \text{ tejido (\%)} = K \text{ muestra (ppm)} \times 0.02$$

en donde 0.02 es el factor de dilución (FD) que se calcula así:

$$FD = \frac{50 \text{ ml sln. extr.}}{1000 \text{ ml sln. extr.}} \times \frac{1 \text{ g K}}{1000 \text{ mg K}} \times \frac{100 \text{ g tej. veget.}}{0.25 \text{ g tej. veg.}} = 0.02$$

4.2.4 Azufre (S)*

Materiales:

Tubos colorimétricos, pipetas de 10 ml, pipetas de 1 ml y colorímetro.

* Tabatabai y Bremner (1970), The Sulphur Institute (1968, Fox et al. (1964).

Reactivos y su preparación:

1. Solución de gelatina (Difco Bacto Gelatin, DIFCO Laboratories Inc., Detroit, Michigan, USA). Disolver 0.1 g de la gelatina en 100 ml de agua doblemente deionizada o destilada caliente (60-70°C) y agitar la solución para enfriarla. Después de 4 h de reposo el fluido semigelatinoso está a la temperatura ambiente; agregar entonces 2.5 g de cloruro de bario de grado reactivo ($\text{BaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), agitando la mezcla hasta cuando el cloruro esté disuelto.
2. Solución semilla: Pesar 0.09086 g de sulfato de potasio (K_2SO_4) y disolver en 500 ml de agua deionizada; cuando esté disuelto, completar el volumen a 1 lt.

Procedimiento:

1. Tomar 10 ml de extracto de tejido vegetal en tubos colorimétricos, agregar 10 ml de la solución semilla y mezclar.
2. Agregar 4 ml de la solución de gelatina-cloruro de bario y agitar. Dejar 20 min en reposo.
3. En un colorímetro a 420 m μ leer el porcentaje de transmitancia usando estándares de S preparados así:
 - a) Disolver 5.434 g de sulfato de potasio (K_2SO_4) grado reactivo en agua deionizada o destilada y diluir a 1 lt. En 1 ml de esta solución hay 1 mg de S (1000 ppm de S).
 - b) A partir de esta solución, preparar un estándar de 80 ppm de S, tomando una alícuota de 20 ml y diluyendo en un balón de 250 ml con agua doblemente deionizada o destilada. Tomar de este estándar alícuotas de 2, 4, 6, 8, 12, 16, 24, 32 y 40 ml en balones de 100 ml. Agregar 3 ml de ácido perclórico (HClO_4) del 70% y 6 ml de ácido clorhídrico 6N.
 - c) Completar el volumen de los balones con agua deionizada y continuar con el mismo procedimiento empleado para las muestras. La concentración que queda en ellos es de 0, 1.6, 3.2, 6.4, 9.6, 12.8, 19.2, 25.6 y 32.0 ppm de S.

Cálculos

El contenido de S en el tejido se calculó así:

$$S \text{ tejido } (\%) = S \text{ muestra (ppm)} \times 0.02$$

en donde, 0.02 es el factor de dilución (FD) que se obtiene así:

$$FD = \frac{50\text{ml sln.extract.} \times 1\text{g S} \times 100\text{g tej.veg.}}{1000\text{ml sln.extr.} \times 1000\text{mgS} \times 0.25\text{g tej.veg.}} = 0.02$$

4.2.5 Aluminio (Al)*

Materiales

Tubos de ensayo graduados de 25 ml, pipetas de 1 ml, pipetas de 2 ml, pipetas de 5 ml, baño de agua en ebullición y colorímetro.

Reactivos

1. Hidróxido de amonio (NH_4OH) 0.20N. Diluir 20 ml del hidróxido concentrado en 800 ml de agua doblemente deionizada o destilada.
2. Aluminon. En vasos separados, disolver en agua doblemente deionizada o destilada: 0.1 g del reactivo "Aluminon" ($\text{C}_{22}\text{H}_{23}\text{N}_3\text{O}_9$ ammoniumaurine tricarboxilate), 20 g de goma acacia y 267 g de acetato de amonio. Cuando estos materiales estén disueltos, mezclarlos y agregar 254 ml de HCl concentrado; filtrar y diluir a 2 lt.
3. Acido tioglicólico 1%: Tomar 1 ml de ácido tioglicólico de grado reactivo y diluir con agua doblemente deionizada o destilada hasta 100 ml.

Procedimiento

1. Transferir 2 ml del extracto de tejido vegetal a un tubo de ensayo graduado de 25 ml. Agregar 8 ml de hidróxido de amonio (0.2N) y 1 ml de la solución de ácido tioglicólico al 1%. Mezclar.
2. Agregar 5 ml de solución de "aluminon" y mezclar nuevamente.

* Chenery (1948), Plant Stress Laboratory, USDA ARS (1975).

3. Calentar en un baño de agua en ebullición durante 16 min y enfriar durante hora y media como mínimo. Completar a un volumen de 25 ml con agua doblemente deionizada o destilada.
4. Mezclar completamente y leer la transmitancia a 537 m μ , usando estándares de Al, preparados así:
 - a) Pesar 8.95 g de cloruro de aluminio ($\text{AlCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$), disolver en agua doblemente deionizada o destilada y completar el volumen a 1 lt. Esta solución contiene 1000 ppm de Al.
 - b) A partir de la solución anterior, preparar una que contenga 25 ppm de Al; para esto, tomar 12.5 ml de la primera (la de 1000 ppm de Al) y diluir a 500 ml con agua doblemente deionizada o destilada.
 - c) De este nuevo estándar, transferir alícuotas de 0, 1, 2, 4, 8, 12, 16 y 20 ml a tubos Taylor de 50 ml; agregar a cada estándar 1.66 ml de ácido perclórico del 70% (para ajustar la normalidad igual que a las muestras), y completar el volumen con agua deionizada o destilada.
 - d) Tomar alícuotas de 2 ml y seguir el procedimiento en forma similar al de las muestras.

Cálculos:

Calcular el contenido de Al en el tejido, aplicando la siguiente fórmula:

$$\text{Al tejido (ppm)} = \text{Al muestra (ppm)} \times 200$$

en donde, 200 es el factor de dilución (FD), el cual se calcula así:

$$\text{FD} = \frac{50\text{ml sln.extr.}}{1000\text{ml sln.extr.}} \times \frac{1000\text{g tejido vegetal}}{0.25\text{g tejido vegetal}} = 200$$

4.3 Determinaciones de Zinc, Cobre, Hierro, Manganeso y Sodio*

4.3.1 Obtención del extracto

Materiales:

Tubos de digestión Taylor graduados, de 12.5, 25, 37.5 y 50 ml, buretas de 50 ml con frasco y plancha caliente para tubos.

Reactivos:

Acido nitro-perclórico: Mezclar 1 lt de ácido nítrico (HNO_3) del 65% analítico-grado reactivo con 500 ml de ácido perclórico (HClO_4) del 70%. La relación entre ácidos es de 2:1.

Procedimiento:

1. Pesar 0.5 g de tejido vegetal molido y seco, y en tubos de digestión Taylor, agregar 5 ml de la mezcla ácido nitro-perclórico.
2. Colocar los tubos en un bloque de aluminio y calentar a una tasa tal que el ácido nítrico sea expedito en 35 a 40 min y teniendo en cuenta que la temperatura final no sea superior a 220°C.
3. Luego de que el ácido perclórico haya reaccionado y aparezcan humos blancos, retirar los tubos y enfriar. Diluir a 12.5 ml con agua doblemente deionizada o destilada. Esta solución constituye el extracto.

4.3.2 Determinaciones

Los elementos Zn, Cu, Fe, Mn y Na se determinan en forma similar a la indicada para su determinación en suelos. El contenido C de cada uno de ellos en el tejido será igual al respectivo contenido en la solución, multiplicado por el factor de dilución, así:

* Baker y Smith (1973), Sarruge y Haag (1974), Chapman y Pratt (1961).

$$C \text{ tejido (ppm)} = C \text{ muestra (ppm)} \times 25$$

donde: C = Zn, Cu, Fe, Mn ó Na y 25 el factor de dilución (FD).

$$FD = \frac{12.5 \text{ ml sol. extr.}}{1000 \text{ ml sol. extr.}} \times \frac{1000 \text{ g tej. veg.}}{0.5 \text{ g tej. veg.}} = 25$$

4.4 Determinación de Boro (B)*

Materiales:

Crisoles de porcelana, mufla, varillas protegidas en su extremo con tubos de goma, embudos y bureta de 100 ml.

Reactivos y su preparación:

1. Solución de H_2SO_4 0.36N. Prepararla tomando 10 ml de H_2SO_4 concentrado (reactivo puro) y diluyendo a 1 lt con agua deionizada o destilada.
2. Solución de H_2SO_4 0.72N. Tomar 20 ml de H_2SO_4 concentrado (reactivo puro) y diluir a 1 lt con agua deionizada o destilada.

Procedimiento:

1. Pesar 0.5 g de tejido vegetal molido y seco en crisoles de porcelana e incinerar en una mufla a 550°C durante $2\frac{1}{2}$ h.
2. Enfriar el crisol y su contenido y añadir 10 ml de H_2SO_4 0.36N, triturando el residuo con una varilla; dejar en reposo durante 1 h.
3. Filtrar y proceder tal como se indica en el procedimiento para suelos, con estándares de boro preparados así:
 - a) Pesar 0.572 g de ácido bórico (H_3BO_3), seco en la estufa a 60°C , y disolver en agua deionizada o destilada; completar el volumen a 1 lt con agua deionizada o destilada. Esta

* Dible et al. (1984).

solución contiene 100 ppm de B.

- b) Colocar alícuotas de 0.5, 1, 2, 3, 4 y 5 ml en balones de 100 ml y agregar 50 ml de la solución de H_2SO_4 0.72N; completar luego el volumen con agua deionizada o destilada. Las concentraciones resultantes son: 0.5, 1, 2, 3, 4 y 5 ppm de B.
- c) Seguir el mismo procedimiento aplicado a las muestras.

Cálculos

El contenido de boro en el tejido se calcula así:

$$B \text{ tejido (ppm)} = B \text{ en la solución (ppm)} \times 20$$

donde 20 es el factor de dilución (FD), el cual se calcula así:

$$FD = \frac{10ml \text{ sol.extract.}}{1000ml \text{ sol.extract.}} \times \frac{1000g \text{ tej.veg.}}{0.5g \text{ tej.veg.}} = 20$$

4.5 Determinación de Sílice Cruda

Materiales:

Tubos Taylor de 50 ml, crisol Gooch de porcelana, planchas para tubos, mufla, asbesto, balanza, vasos de 250 ml y Erlenmeyers de vacío.

Reactivo:

Acido nítrico-ácido perclórico en una relación de 2:1.

Procedimiento:

1. Pesar 0.5 g de tejido vegetal, colocar en un tubo Taylor y agregar 5 ml de ácido nítrico-perclórico (relación 2:1).
2. Digerir la muestra en plancha caliente. Transferir la solución digerida a un vaso de 250 ml, lavando bien el tubo.
3. Preparar un Erlenmeyer de vacío introduciendo un crisol Gooch de

porcelana con capa de asbesto; el crisol debe estar previamente pesado.

4. Filtrar el contenido del vaso a través del crisol Gooch de porcelana con capa de asbesto; lavar con agua abundante hasta obtener un "test negativo a ácido".
5. Incinerar en una mufla a la temperatura de 550°C durante 2 h. Dejar enfriar y pesar.

Cálculos

$$\text{Sílice cruda (\%)} = \frac{\text{peso de la muestra seca en la mufla (g)}}{0.5 \text{ g de la muestra}} \times 100$$

0.5 = peso inicial de la muestra

5. DIAGNOSTICO NUTRICIONAL EN SUELOS ACIDOS Y PASTOS TROPICALES

5.1 El Diagnóstico Nutricional. Importancia y Secuencia

La reacción que presentan las plantas forrajeras a la falta de elementos minerales en el suelo constituye un factor determinante de su distribución natural, así como de su habilidad para sobrevivir o producir en un ecosistema dado, sea o no modificado por el hombre. Esta reacción permite identificar respuestas diferenciales a las condiciones del ecosistema, no sólo entre especies sino entre ecotipos de una misma especie forrajera.

Ese hecho permite llegar a conocer el potencial productivo de la planta, potencial que está definido por la capacidad de absorción y de uso de nutrimentos que ella tenga; conocerlo es esencial para seleccionar las mejores especies para una determinada situación, como también para conocer las interacciones existentes en una comunidad de plantas forrajeras.

Se puede considerar que el estado nutricional de un suelo es satisfactorio cuando éste puede suministrar a la planta forrajera nutrimentos en una concentración y a una tasa suficientes para satisfacer sus necesidades. Es necesario tener en cuenta que los requerimientos nutricionales para el mantenimiento de las pasturas pueden diferir de los requerimientos para el establecimiento, y que el estado nutricional del suelo puede cambiar con el tiempo por efecto de la remoción del sistema, del reciclaje y de pérdidas como las ocurridas por lixiviación y fijación. El suministro adecuado de nutrimentos a la planta constituye por lo tanto un proceso dinámico, afectado por factores del medio ambiente, la planta y el suelo.

El objetivo principal de un diagnóstico nutricional del suelo es determinar los nutrimentos que en el momento están limitando el desarrollo de la planta forrajera, y la cantidad que se necesitaría de cada uno de ellos para eliminar esa limitación en función de la respuesta diferencial que dicha planta presente. Una primera aproximación

de ese diagnóstico se puede obtener mediante una evaluación del recurso tierra, que describa en forma general la naturaleza de los suelos, su clasificación, su distribución y su composición física y química.

En relación con el establecimiento de pasturas, existen varias técnicas para el diagnóstico; entre ellas están el uso adecuado de los análisis de suelos y plantas, los experimentos de invernadero y de campo y el diagnóstico de síntomas visuales de deficiencias nutricionales. Cuando se trata de áreas nuevas, una secuencia lógica para el diagnóstico con respecto a un determinado ecosistema podría incluir los siguientes pasos y actividades:

1. Evaluación del recurso tierra.
 - a) Descripción y representación geográfica del clima, el suelo y la vegetación.
 - b) Caracterización química de los suelos y los perfiles del suelo.
 - c) Evaluación inicial del potencial productivo de los suelos.
2. Diagnóstico general del estado nutricional del suelo y de la planta forrajera.
 - a) Prueba, estudio y selección de métodos más convenientes para el análisis de suelos y plantas.
 - b) Estudio de las relaciones entre el estado nutricional y los factores edafológicos.
 - c) Diagnóstico sobre síntomas visuales de deficiencias nutricionales en las plantas forrajeras.
3. Estudios sobre la adaptación y el establecimiento de especies forrajeras en el ecosistema.
 - a) Caracterización agronómica de las especies forrajeras.
 - b) Estudios de fertilización con las especies promisorias.
4. Estudio sobre el mantenimiento y desarrollo de pasturas en un ecosistema.

- a) Análisis de problemas específicos de mantenimiento.
- b) Pruebas analíticas de suelos y plantas.
- c) Estudios sobre requerimientos nutricionales para el mantenimiento de pasturas.
- d) Estudios sobre manejo del sistema suelo-planta-animal.

5.2 Parámetros Químicos Edáficos

Para facilitar la interpretación de los datos obtenidos en los análisis de suelos ácidos de América tropical con destino a la producción de pasturas, se han determinado algunos parámetros edáficos que pueden definir la existencia de problemas nutricionales en tales suelos.

Así, mediante numerosos ensayos de calibración (con los métodos analíticos incluidos en el presente manual), se han determinado las concentraciones mínimas o máximas de elementos (Cuadro 5.1) que implican condiciones de deficiencia o toxicidad. Usando estos datos como pautas, es posible determinar las limitaciones químicas del suelo y su posible control, como también determinar el tipo de especie forrajera que se puede establecer en él.

Las Figuras 5.1 - 5.6 son los diagramas interpretativos elaborados de acuerdo con el Cuadro 5.1; a manera de ejemplo. Se observa que no todos los suelos que se han seleccionado en América tropical para establecer ensayos regionales sobre adaptación de germoplasma forrajero presentan todas las condiciones que definen un suelo ácido de baja fertilidad: pH 5.3; saturación de Al 70%; saturación de Ca 20%; saturación de Mg 10% y cantidad de P disponible 3 ppm.

Cuadro 5.1. Parámetros químicos que definen los niveles de acidez y de fertilidad para el establecimiento de especies forrajeras en suelos tropicales.

Parámetro	Valores ¹ de los parámetros según categoría ² del suelo			
	Bajo* Muy Acido**	Medio* Acido**	Alto* lig. Acido**	Muy Alto* Neutro**
pH	4.5	4.5 - 5.5	5.5 - 6.5	6.5
P (ppm)	2	2- 5	5-10	10
K (meq/100 g)	0.05	0.05- 0.10	0.10-0.15	0.15
Mg (meq/100 g)	0.08	0.08- 0.12	0.12-0.20	0.20
Saturación Al (%)	80	80-60	60-40	40
Saturación Ca (%)	20	20-40	40-60	60
Saturación Mg (%)	5	5-15	15-30	30
S (ppm)	10	10-15	15-20	20
Zn (ppm)	0.5	0.5-1.0	1.0-1.5	1.5
Cu (ppm)	0.5	0.5-1.0	1-3	3
B (ppm)	0.3	0.3-0.5	0.5-1.0	1
Mo (ppm)	5	5-8	8-12	2
Mn (ppm) ³	80	50-80	20-50	20

1/ Valores determinados con la metodología descrita en este manual.

2/ Categoría definida por el nivel de fertilidad (*) y el de acidez (**) del suelo.

3/ Los contenidos de Mn se refieren al grado de toxicidad de este elemento y no al requerimiento nutricional.

Fuente: Suelos-Nutrición de Plantas. Programa de Pastos Tropicales. CIAT.

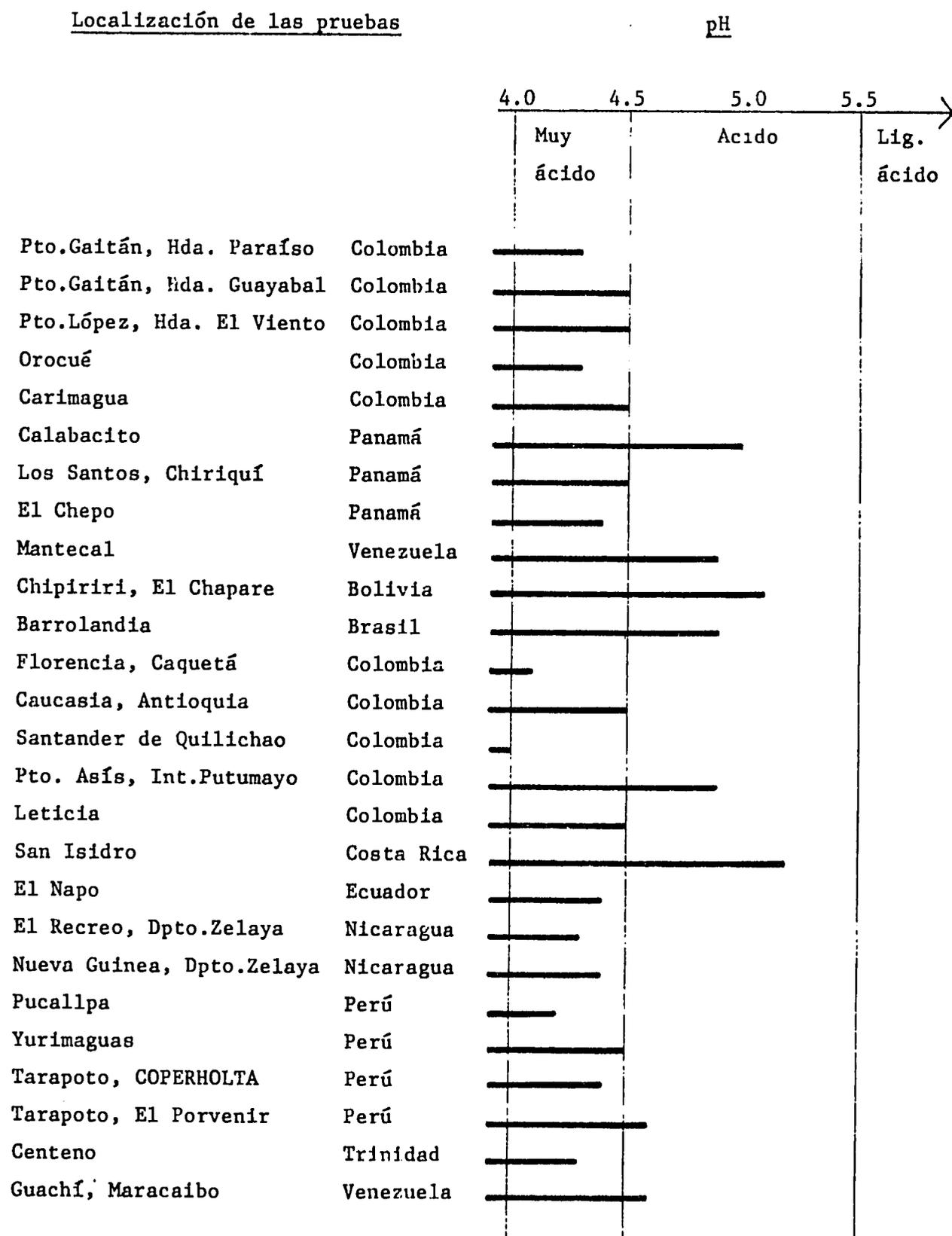


Figura 5.1. Diagrama interpretativo del pH en suelos ácidos tropicales de algunas pruebas regionales para evaluación de germoplasma forrajero en América Latina.

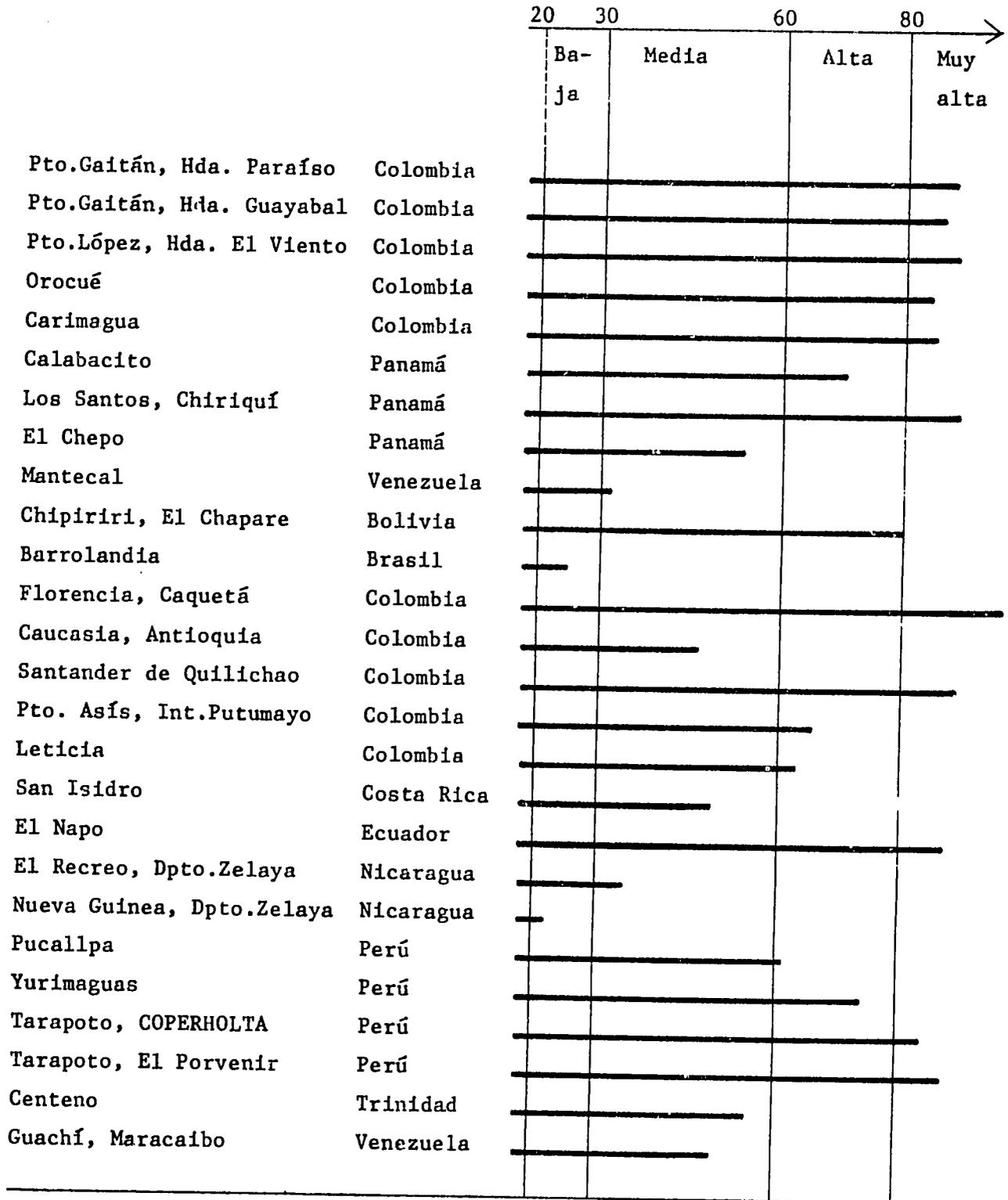
Localización de las pruebasSaturación de Al (%)

Figura 5.2. Diagrama interpretativo de la saturación de Aluminio (%) en suelos ácidos tropicales de algunas pruebas regionales de germoplasma forrajero en América Latina.

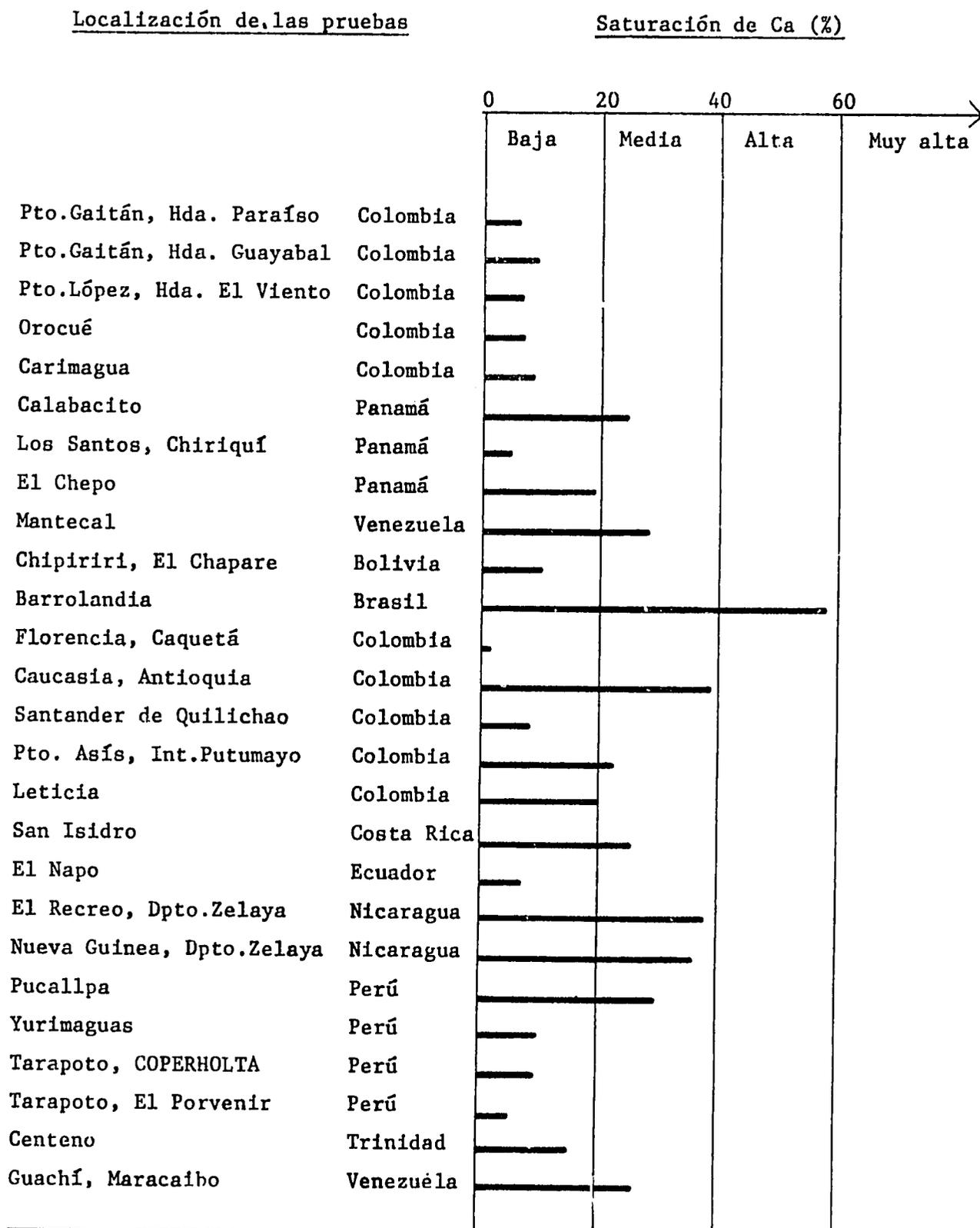


Figura 5.3. Diagrama interpretativo de la saturación de calcio (%) en suelos ácidos tropicales de algunas pruebas regionales para evaluación de germoplasma forrajero en América Latina.

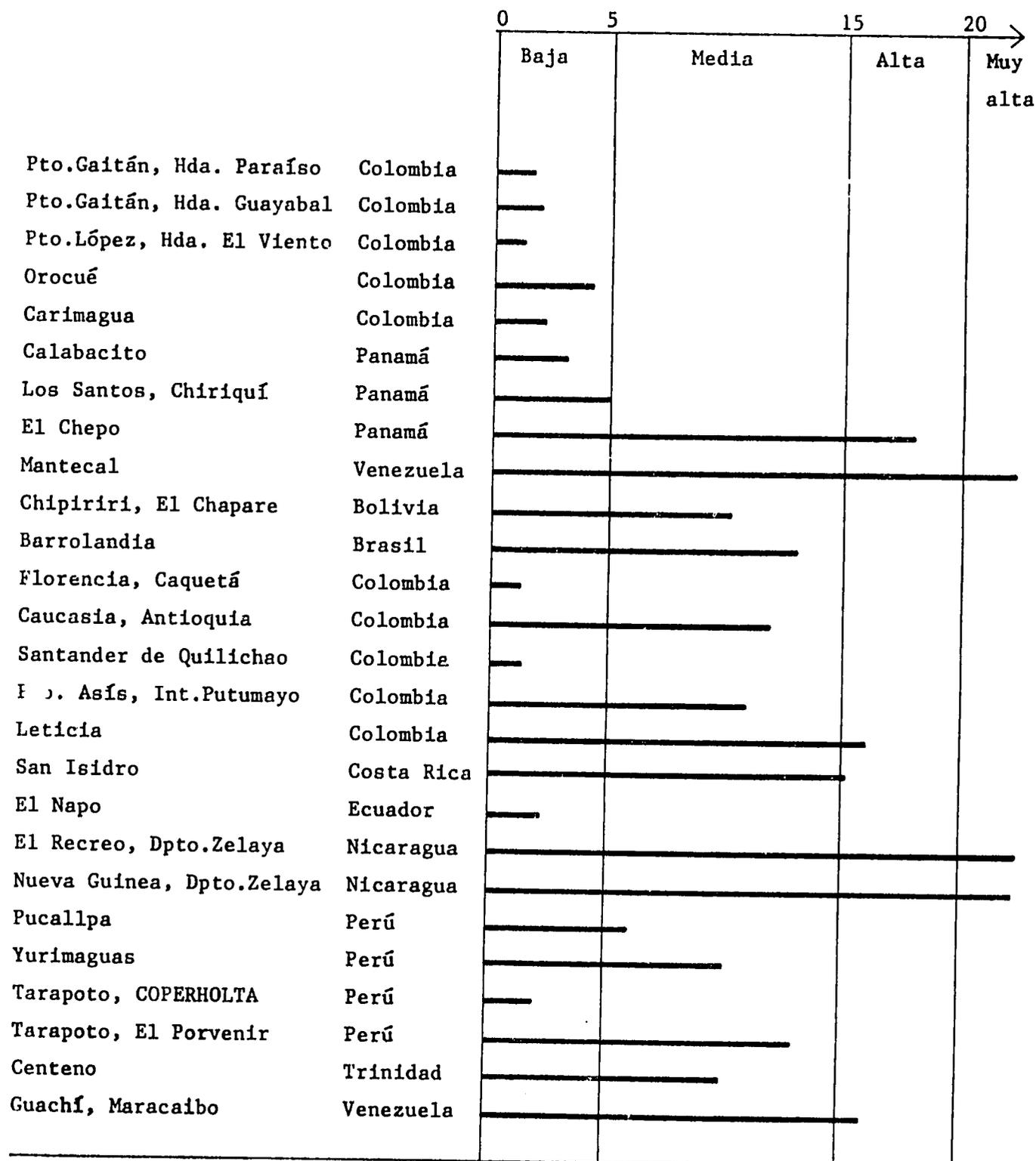
Localización de las pruebasSaturación de Mg (%)

Figura 5.4. Diagrama interpretativo de la saturación de magnesio (%) en suelos ácidos tropicales de algunas pruebas regionales para evaluación de germoplasma forrajero en América Latina.

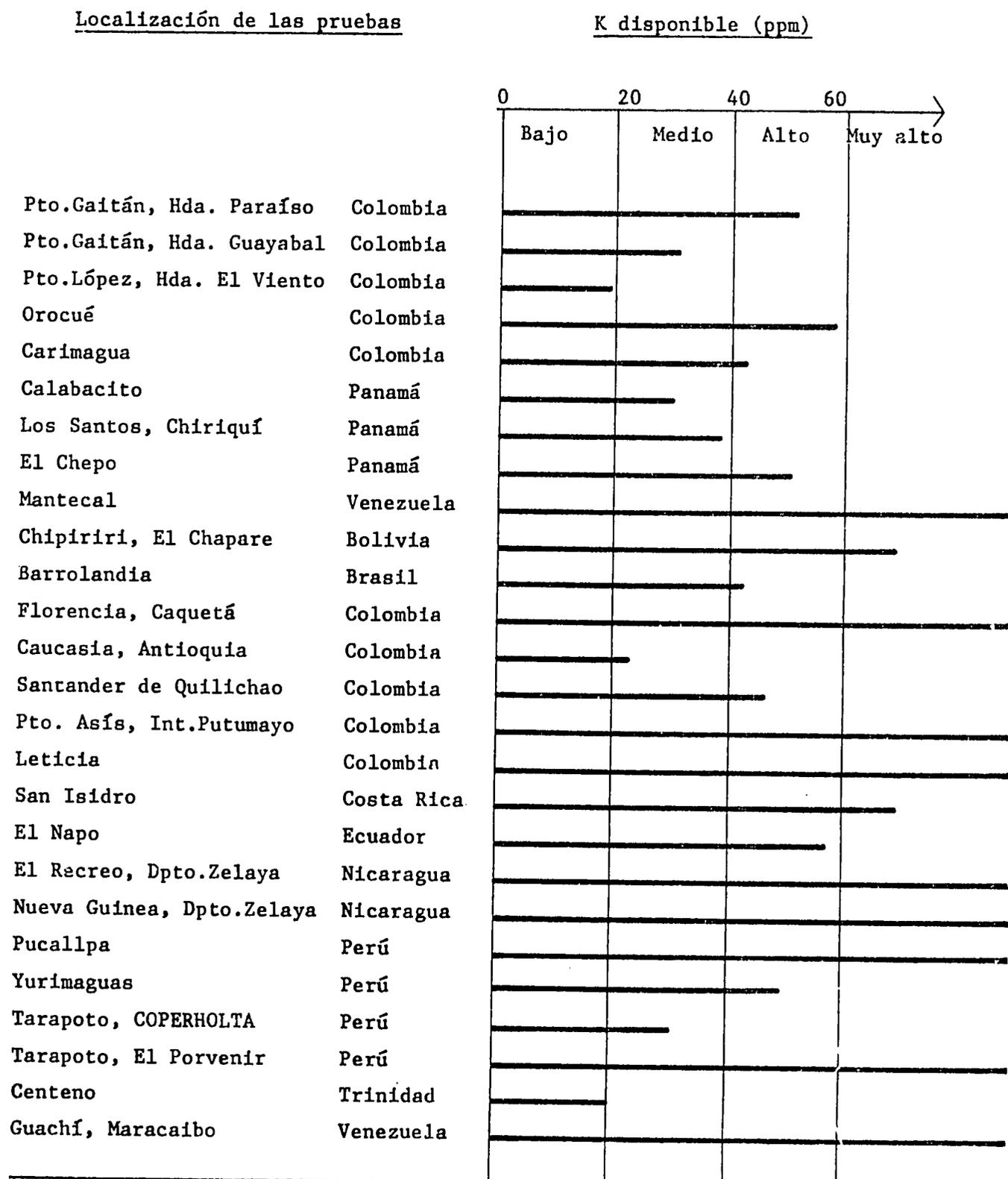


Figura 5.5. Diagrama interpretativo del potasio disponible (ppm) en suelos ácidos tropicales de algunas pruebas regionales para evaluación de germoplasma forrajero en América Latina.

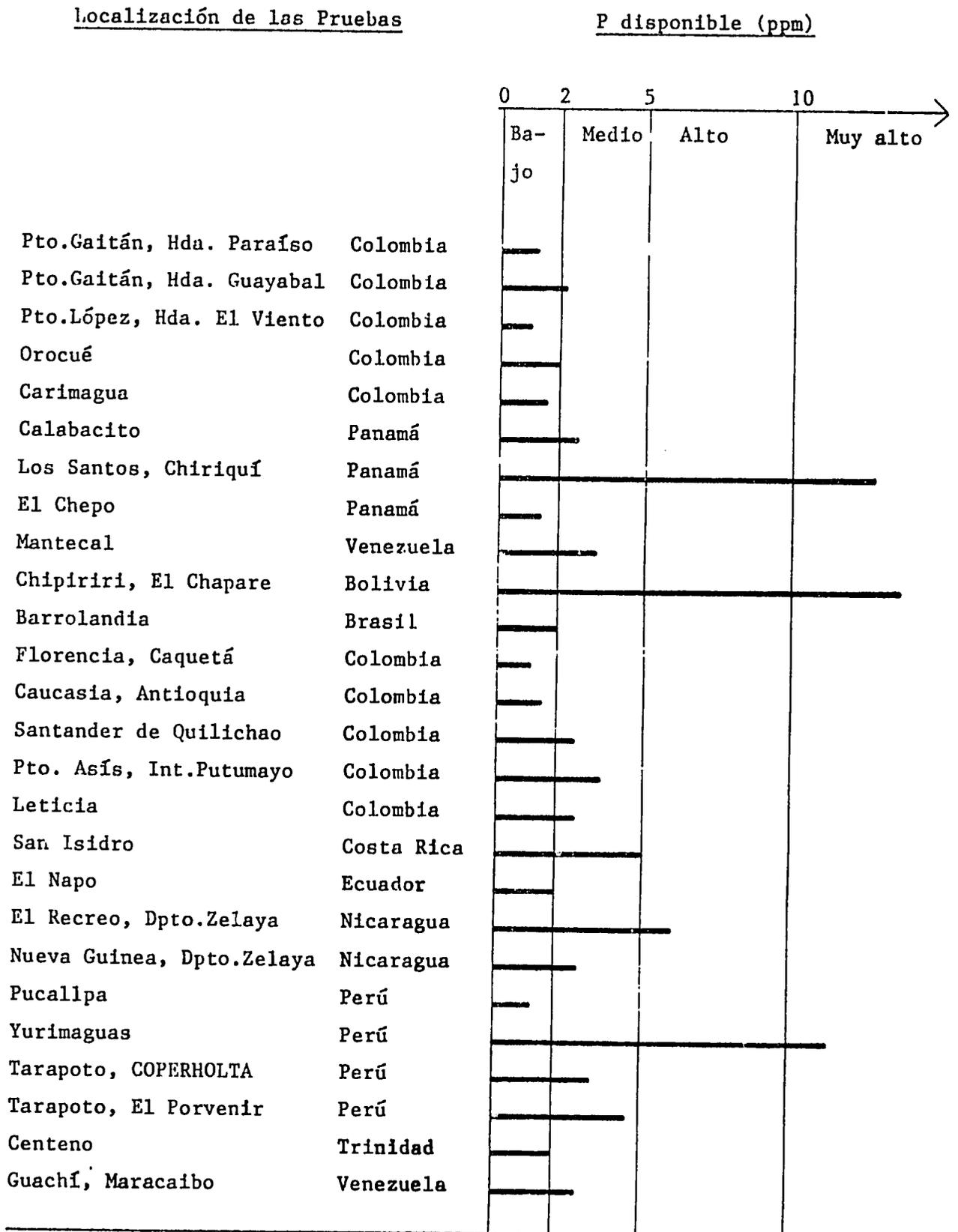


Figura 5.6. Diagrama interpretativo de fósforo disponible (ppm) en suelos ácidos tropicales de algunas pruebas regionales para evaluación de germoplasma forrajero en América Latina.

5.3 Niveles Críticos Nutricionales en Pastos Tropicales

Como resultado de la respuesta diferencial de especies y variedades a las diferentes condiciones del suelo, durante los últimos años surgió la filosofía de insumos bajos para la fertilización (Sánchez y Salinas, 1983). Con este enfoque no se pretende eliminar totalmente la fertilización, sino presentar una alternativa para reducir los niveles de fertilizantes y enmiendas, en función del requerimiento nutricional de la especie considerada.

Cuando se habla de fertilización, es más conveniente referirse a insumos críticos que a insumos máximos o mínimos, puesto que su uso depende de los requerimientos nutricionales críticos de cada especie, en función de su rendimiento. Por consiguiente, la aplicación de fórmulas de una fertilización baja o alta dependerá específicamente de si la especie de interés tiene un requerimiento crítico nutricional bajo o alto para poder producir un rendimiento adecuado. Esta situación se extiende al caso de elementos tóxicos (Al y Mn), refiriéndose a niveles críticos de tolerancia.

En síntesis, con el razonamiento anterior se está destacando la importancia de determinar previamente los niveles críticos nutricionales del suelo y de la planta; en la mayoría de los esquemas de diagnóstico, dicho nivel se refiere al contenido de nutrimentos por debajo del cual la producción declina significativamente (Ulrich, 1952).

El criterio anterior (niveles críticos nutricionales) se aplica ampliamente en la actualidad; sin embargo, para que sea realmente útil exige que se haga un buen estimado de la curva de rendimiento y se cuantifique la dosis de fertilizante requerida para obtener el nivel crítico del nutrimento en el suelo y en la planta (especie).

Para interpretar las concentraciones críticas nutricionales y estimar las dosis de fertilizantes que se necesitan para obtener un rendi-

miento adecuado, las técnicas disponibles de diagramas de dispersión y el uso de modelos discontinuos desarrollados por Cate y Nelson (1971) son herramientas útiles. La caracterización nutricional permite distinguir dentro del germoplasma grupos de gramíneas y leguminosas con niveles críticos nutricionales bajos y altos.

5.3.1 Factores que afectan los niveles críticos nutricionales

Hay varios factores que se deben considerar en la determinación de los niveles críticos nutricionales. Entre los más importantes están: la edad y el tipo del tejido, y las diferencias entre especies y ecotipos dentro de una especie.

Hay que tener en cuenta que las variaciones en la movilidad y en la traslocación de nutrimentos dentro de la planta ocasionan diferencias acentuadas en la concentración de nutrimentos en los tejidos de edad diferente; así, en la mayoría de las especies, el Ca y el B generalmente se consideran menos móviles mientras el N, el P, el K y el Na se traslocan rápidamente de los tejidos viejos hacia los jóvenes; la movilidad de los elementos Mg, S, Fe, Zn y Mn es intermedia entre los extremos anteriores (Crafts y Crisp, 1971).

Como resultado de la mayor o menor movilidad de nutrimentos, una restricción en el suministro de los menos móviles se refleja rápidamente en su concentración en los tejidos viejos y en síntomas foliares de deficiencia en los tejidos jóvenes. En el caso de los nutrimentos móviles, la rapidez con que se presenta una deficiencia dependerá de la tasa de traslocación y de la cantidad transportada desde los tejidos viejos hacia los jóvenes.

Según Smith (1978), para el caso de las plantas forrajeras existen dos enfoques para analizar el efecto de la edad del tejido sobre el nivel crítico de nutrimentos. El primero es un enfoque uniforme para un estado particular de desarrollo de la planta, muestreándola y analizándola en su totalidad. Este método de muestreo indica una

pérdida de sensibilidad debida a la mezcla tejido vegetal de diferente tipo y edad; no obstante, algunos investigadores con experiencia en el manejo de este tipo de muestras han encontrado el método adecuado para diagnosticar o verificar el estado nutricional de la planta. El otro enfoque consiste en seleccionar tejido vegetal de la misma edad fisiológica; es el método que se recomienda para especies forrajeras bajo pastoreo, cuando posiblemente no hay plantas enteras disponibles para el muestreo.

El tipo de tejido es un factor importante para la caracterización del nutrimento en estudio; generalmente se emplean tejidos jóvenes para la determinación de los nutrimentos menos móviles, mientras los tejidos más viejos se usan para los nutrimentos más móviles. La Figura 5.7 ilustra el muestreo de tejido foliar de leguminosas y gramíneas forrajeras en ensayos de parcelas bajo corte, según la edad fisiológica del follaje (Salinas, 1982).

Las especies y los ecotipos forrajeros presentan una amplia variabilidad en sus requerimientos nutricionales y en sus habilidades para absorber y acumular elementos minerales. En el Cuadro 5.2 se observa esta variabilidad y se comprueba que ella ocurre tanto en época lluviosa como en época seca.

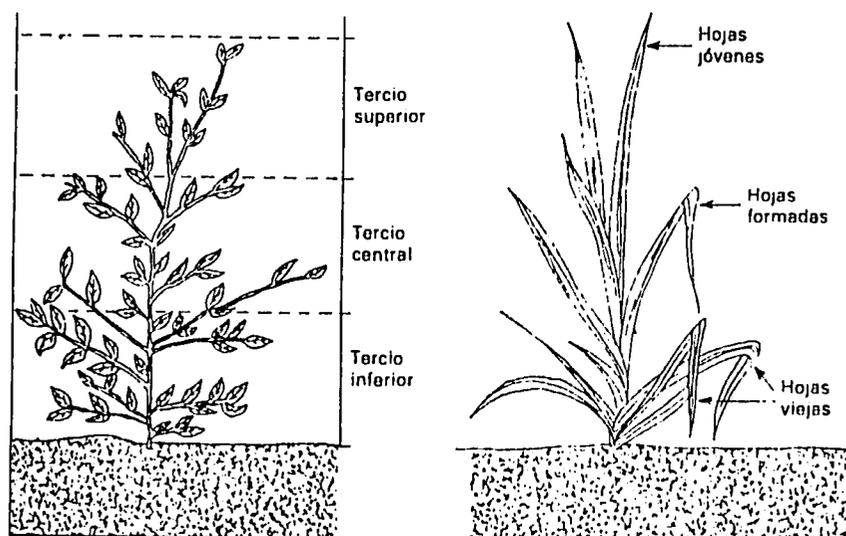


Figura 5.7. Distribución del follaje según edad fisiológica del mismo en leguminosas y gramíneas forrajeras.

Cuadro 5.2. Niveles críticos de P, K, Ca y S en el tejido de algunas gramíneas y leguminosas forrajeras del trópico, durante su establecimiento y según época lluviosa o seca.

Especie	Concentración (%)							
	Fósforo		Potasio		Calcio		Azufre	
	Lluv.	Seca	Lluv.	Seca	Lluv.	Seca	Lluv.	Seca
GRAMINEAS								
<u>Brachiaria humidicola</u>	0.08	0.05	0.74	0.39	0.22	0.25	0.11	0.12
<u>Brachiaria brizantha</u>	0.09	0.05	0.82	0.44	0.37	0.32	0.12	0.12
<u>Brachiaria decumbens</u>	0.08	0.05	0.83	0.38	0.37	0.30	0.12	0.13
<u>Andropogon gayanus</u>	0.10	0.04	0.95	0.53	0.23	0.21	0.13	0.10
<u>Melinis minutiflora</u>	0.18	0.06	0.90	0.60	0.32	0.35	0.15	0.12
<u>Panicum maximum</u>	0.17	0.10	1.15	0.80	0.60	0.40	0.15	0.12
<u>Hiparrhenia rufa</u>	0.16	0.06	1.06	0.70	0.34	0.25	0.14	0.10
LEGUMINOSAS								
<u>Stylosanthes capitata</u>	0.12	0.09	1.13	0.61	0.97	0.54	0.12	0.15
<u>Stylosanthes macrocephala</u>	0.10	0.08	0.93	0.50	0.78	0.49	0.14	0.15
<u>Desmodium ovalifolium</u>	0.10	0.08	1.03	0.43	0.74	0.64	0.12	0.14
<u>Pueraria phaseoloides</u>	0.22	0.10	1.22	0.66	1.04	0.57	0.17	0.19
<u>Centrosema macrocarpum</u>	0.16	0.09	1.24	0.72	0.72	0.57	0.16	0.15
<u>Codariocalyx gyroides</u>	0.17	0.11	1.15	0.57	0.66	0.48	0.16	0.15
<u>Zornia latifolia</u>	0.12	0.08	1.16	0.43	0.82	0.66	0.17	0.17
<u>Centrosema pubescens</u>	0.18	0.11	1.40	0.74	0.98	0.74	0.16	0.15
<u>Zornia sp.</u>	0.14	0.09	1.00	0.68	0.53	0.50	0.17	0.16

Fuente: CIAT, Informes Anuales, Programa Pastos Tropicales (1980, 1981, 1982).

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Allison, L.E. 1965. Organic carbon. En: Black, C.A. et al. (ed.).
Methods of soil analysis. II. Chemical and microbiological
properties, Amer. Soc. Agr., Madison, Wisconsin, E.U. pp.
1367-1368.
- Baker, A.S. y Smith, R.R. 1973. Preparation of solutions for atomic
absorption analyses of Fe, Mn, Zn, and Cu in plant tissue.
J. Agr. Food Chem. 22:103.
- Bartlett, F.D. y Weller, J.R. 1960. Turbidimetric determination of
sulfate-sulfur in soil extracts. Soil Sci. 90:201-204.
- Bornemisza, E.; Constenla, M.; Alvarado, A.; Ortega, E.J.; Vásquez,
A.J. 1979. Organic carbon determination by the Walkley-Black
and dry combustion methods in surface soils and Andept profiles
from Costa Rica. Soil Sci. Soc. Am. J. 43:78-83.
- Bray, R.H. y Kurtz, L.T. 1945. Determination of total, organic, and
available forms of phosphorus in soil. Soil Sci. 59:39-45.
- Bremner, J.M. 1965. Total nitrogen. En: Black, C.A. et al. (ed.).
Methods of soil analysis. II. Chemical and microbiological
properties. Amer. Soc. Agr., Madison, Wisconsin, E.U. pp.
1149-1178.
- Cate Jr., R.B. y Nelson, L.A. 1971. A simple statistical procedure
for partitioning soil test correlation data into two classes.
Soil Sci. Soc. Amer. Proc. 35:658-659.
- Centro Internacional de Agricultura Tropical. 1981. Programa de
Pastos Tropicales, Informe Anual 1980. Cali, Colombia. 138 p.
- _____. 1982. Programa de Pastos Tropicales, Informe Anual
1981, Cali, Colombia. 302 p.
- _____. 1983. Red Internacional de Evaluación de Pastos
Tropicales; Resultados 1979-1982. Pizarro, E.A. (ed.). Cali,
Colombia. 460 p.
- Chapman, H.D. 1965. Cation-exchange capacity. En: Black, C.A. et al.
(ed.) Methods of soil analysis. II. Chemical and microbiological
properties. Amer. Soc. Agr., Madison, Wisconsin, E.U. pp.
891-901.

- Chapman, H.D. y Pratt, P.F. 1961. Methods of analysis for soils, plants and waters. University of California, Division of Agricultural Sciences, Riverside, E.U. 309 p.
- Chenery, E.M. 1948. Thioglycolic acid as an inhibitor for iron in the colorimetric determination of aluminum by means of aluminom. *Analyst* 73:501-502.
- Cline, M.G. 1944. Principles of soil sampling. *Soil Sci.* 58: 275-288.
- Coleman, N.T. y Thomas, G.W. 1967. The basic chemistry of soil acidity. *Agron. Monogr.* 12. pp.1-41.
- Crafts, A.S. y Crisp, C.E. 1971. Phloem transport in plants. W.H. Freeman and Co., San Francisco, California, E.U. 482. p.
- Dewis, J. y Freitas, F. 1970. Physical and chemical methods of soil and water analysis. *FAO Soil Bull.* no.10, Roma, Italia.
- Dible, W.T.; Truog, W.; Berger, K.C. 1954. Boron determination in soils and plants. Simplified curcumin procedure. *Anal. Chem.* 26:418-421.
- Ensminger, L.E. 1954. Some factors affecting the adsorption of sulfate by Alabama soils. *Soil Sci. Amer. Proc.* 18:259-264.
- Fox, R.L.; Olsen, R.A.; Rhoades, H.F. 1964. Evaluating the sulfur status of soils by plant and soil tests. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* 28:243-246.
- Gardner, W.H. 1965. Water content. En: Black, C.A. et al. (ed.). *Methods of soil analysis. I. Physical and Mineralogical Properties.* Amer. Soc. Agr., Madison, Wisconsin, E.U. pp. 82-127.
- Hausenbuiller, R.L. 1957. Sampling saline and alkali soils for laboratory analysis. *Washington Agr. Exp. Sta. Circular* 303. 6 p.
- Hunter, A.H. 1974. Laboratory analysis of plant tissue samples. *International Soil Fertility Evaluation and Improvement*, Raleigh, N.C., E.U. 5 p.
- Jackson, M.L. 1964. Análisis químico de suelos. Omega, Barcelona, España. 662 p.
- Johnson, C.M. y Ulrich, A. 1959. Analytical methods. *California Agr. Exp. Sta. Bull.* 766 p.

- Jones, J.B. y Steyn, W.J.A. 1973. Sampling, handling and analyzing plant tissue samples. En: Walsh, L.M. y Beaton, J.D. (eds.). Soil testing and plant analysis. Soil Sci. Amer., Madison, Wisconsin, E.U. pp. 249-270.
- Lin, C. and Coleman, N.T. 1960. The measurement of exchangeable aluminum in soils and clays. Soil Sci. Soc. Amer. Proc. 24:444-446.
- Massoumi, A. y Cornfield, A.H. 1963. A rapid method for determining sulphate in water extracts of soil. Analyst 88:321-322.
- Matt, K.J. 1968. Colorimetric determination of phosphorus in soil and plant materials with ascorbic acid. Soil Sci. 109:214-220.
- McGaveston, D.A. y Widdowson, J.P. 1978. Comparison of six extractants for determining available phosphorus in soils from the Kingdom of Tonga. Trop. Agric. (Trinidad) 55:141-148.
- Minor, R.S. 1957. Physical measurements. I. Berkeley, California, E.U. 180 p.
- Murphy, J. y Riley, J. 1963. A modified single solution method for the determination of phosphate in natural waters. Anal. Chem. Acta 27: 31-35.
- Nelson, W.L.; Mehlich, A.; Winters, E. 1953. The development, evaluation and use of soil tests for phosphorus availability. Agron. J. 4:153-188.
- Olsen, S.R.; Cole, C.V.; Watanabe, F.S.; Dean, L.A. 1954. Estimation of available phosphorus in soils by extraction with sodium bicarbonate. USDA Circular 939; pp.1-19.
- _____ y Dean, L.A. 1965. Phosphorus. En: Black, C.A. et al. (ed.). Methods of soil analysis. II. Chemical and microbiological properties. Amer. Soc. Agr., Madison, Wisconsin, E.U. pp.1035- 1049.
- _____ ; Koch, C.R.; Pimentel, G.C. 1956. Introductory quantitative chemistry. Freeman & Co., San Francisco, California, E.U. 470 p.
- Peck, T.R. y Melsted, S.W. 1973. Field sampling for soil testing. En Walsh, L.M. y Beaton, J.D. (eds.). Soil testing and plant analysis (Revised edition). Soil Sci. Soc. of America, Inc. Madison, Wisconsin, E.U. 491 p.

- Peech, M.; Alexander, L.T.; Dean, L.A.; Reed, J.F. 1947. Methods of soil analysis for soil fertility investigations. USDA Circular 757. 25 p.
- Peech, M. 1965. Hydrogen-ion activity. En: Black, C.A. et al. (eds.). Methods of soil analysis. II. Chemical and microbiological properties. Amer. Soc. Agr., Madison, Wisconsin, E.U. pp. 914-926.
- Petersen, R.G. y Calvin, L.D. 1965. Sampling. En: Black, C.A. et al. (eds.). Methods of soil analysis. Agronomy no.9. I. Amer. Soc. Agr. Madison, Wisconsin, E.U. 770 p.
- Plant Stress Laboratory, USDA-ARS. 1975. The aluminom procedure for determining aluminum in plant tissue. Beltsville, Maryland, E.U. 5 p.
- Powell, G.T. y Allen, M.G. 1979. Borum determination in plant tissues by the Azomethine H. method. Comm. Soil Sci. Pl. Anal. 10(8):1099-1108.
- Pratt, P.F. y Bair, F.L. 1961. A comparison of three reagents for the extraction of aluminum from soils. Soil Sci. 91:357-359.
- Reed, J.F. y Rigney, J.A. 1947. Soil sampling from fields of uniform and non-uniform appearance and soil types. Jour. Amer. Soc. Agron. 39:26-40.
- Richards, L.A. 1954. Diagnosis and improvement of saline and alkali soils. U.S. Salinity Laboratory, USDA Handbook no.60. 160 p.
- Salinas, J.G. 1982. Muestreo de suelo y tejido vegetal en los ensayos regionales A y B. En: Toledo, J.M. (ed.) Manual para la evaluación agronómica, Red Internacional de Evaluación de Pastos Tropicales. CIAT, Cali, Colombia. pp.111-116.
- Sánchez, P.A. y Salinas, J.G. 1983. Suelos ácidos, estrategias para su manejo con bajos insumos en América tropical. Soc. Col. de la Ciencia del Suelo, Bogotá, Colombia. 93 p.
- _____. 1976. Properties and management of soil in the tropics. Wiley, New York, N.Y., E.U. pp.135-160.
- Sarrugé, J.R. y Haeg, H.P. 1974. Análises químicos em plantas. E.S.A. Luiz de Queiroz, Piracicaba, Sao Paulo, Brasil. 56 p.

- Smith, F.W. 1978. Role of plant chemistry in the diagnosis of nutrients disorders in tropical legumes. En: Andrew, C.S. y Kampratt, E.J. (eds.) Mineral nutrition of legumes in tropical and subtropical soils. CSIRO, Melbourne, Australia. pp.329-346.
- Steel, R.G. y Torrie, J.H. 1960. Principles and procedures of statistics. McGraw-Hill, New York, N.Y., E.U. 481 p.
- Steyn, W.J.A. 1959. Leaf analysis. Errors involved in the preparative phase. J. Agr. Food Chem. 7:344-348.
- Tabatabai, M.A. y Bremner, J.H. 1970. A simple turbidimetric method of determining total sulfur in plant materials. Agr. J. 62:805-806.
- Tabatabai, M.A. y Bremner, J.M. 1972. Distribution of total and available sulfur in selected soils and soil profiles. Agr. J. 64:40-44.
- The Sulphur Institute. 1968. Determination of sulphur in soil and plant material. Tec. Bull. 14:36-40.
- Uehara, G. y Keng, J. 1975. Management implications of soil mineralogy in Latin America. En: Bornemisza, E. y Alvarado, A. (eds.). Soil management in tropical America. North Carolina State University, Raleigh, E.U. pp. 351-363.
- Ulrich, A. 1952. Physiological bases for assessing the nutritional requirements of plants. Ann. Rev. Plant Physiol. 3:207-228.
- Walkley, A. y Black, I.A. 1934. An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter and a proposed modification of the chronic acid titration method. Soil Sci. 37:29-38.
- Wear, J.I. 1965. Boron. En: Black, C.A. et al. (eds.), Methods of soil analysis. II. Chemical and microbiological properties. Amer. Soc. Agr. Madison, Wisconsin, E.U. pp.1059-1063.