

PROPIEDADES DEL SUELO EN RELACION CON
DEFICIENCIAS DE BORO EN EL VALLE DEL CAUCA

T E S I S

PRESENTADA AL PROGRAMA DE ESTUDIOS PARA GRADUADOS
UNIVERSIDAD NACIONAL - INSTITUTO COLOMBIANO AGROPECUARIO

POR

FABIO GARAVITO NEIRA

COMO REQUISITO PARCIAL PARA OPTAR AL TITULO DE
MAGISTER SCIENTIAE

BOGOTA - COLOMBIA

1976

TESIS APROBADA POR COMITE CONSEJERO

ALFREDO LEON S., Químico Ph.D.

Alfredo León

RODRIGO LORA S., Ing. Químico M.Sc.

Rodrigo Lora

JAVIER BERNAL E., I. A. Ph.D.

Javier Bernal

"El presidente de tesis y el consejo examinador de grado, no serán responsables de las ideas emitidas por el candidato".

(Artículo 217 de los estatutos de la Universidad Nacional).

AGRADECIMIENTO

Al Doctor Alfredo León S., por su valiosa colaboración y dirección.

Al Doctor Abdón Cortés L., y demás funcionarios de la Subdirección Agrológica del Instituto Geográfico "Agustín Codazzi" por la valiosa ayuda prestada en la ejecución del presente trabajo.

Al Doctor Carlos Flor del Centro Internacional de Agricultura Tropical por su asesoría en la selección de sitios de muestreo y colaboración en el mismo.

A la Señora Isabel Cristina de García por su labor de mecanografía.

CONTENIDO

	Pag.
1. INTRODUCCION	1
2. REVISION DE LITERATURA	2
2.1. Origen del Boro en el Suelo	2
2.1.1. Boro en rocas ígneas	2
2.1.2. Boro en los sedimentos	3
2.2. Formas y Cantidades de Boro en el Suelo	5
2.2.1. Formas de boro	5
2.2.1.1. Formas Inorgánicas	5
2.2.1.2. Formas Orgánicas	5
2.2.2. Cantidades de boro en el Suelo	6
2.3. Reacciones del Boro en el Suelo	6
2.3.1. Factores que afectan las reacciones de boro en el suelo.	7
2.3.1.1. pH	7
2.3.1.2. Nivel de cal	8
2.3.1.3. Hidróxidos de hierro y Aluminio	9
2.3.1.4. Arcillas	11
2.3.1.5. Materia orgánica	13
2.3.1.6. Temperatura y Secado	14
2.4. Factores que afectan la disponibilidad de boro	14
2.4.1. pH y Carbonatos de Calcio	14
2.4.2. Interacciones de boro con otros elementos	15
2.4.2.1. Relación calcio-boro	15

	Pag.
2.4.2.2. Relación potasio-boro	17
2.4.2.3. Relación nitrógeno-boro	17
2.4.3. Clima	18
2.4.4. Materia Orgánica	19
2.4.5. Material parental	20
2.4.6. Textura	20
2.4.7. Remoción por cosechas	21
2.5. Deficiencias de Boro en Suelos del Valle del Cauca	21
3. MATERIALES Y METODOS	23
3.1. Generalidades de la zona	23
3.1.1. Localización	23
3.1.2. Clima	23
3.1.3. Geología y Suelos	23
3.2. Suelos Estudiados	24
3.3. Muestreo, Descripción y Clasificación de los Suelos	25
3.3.1. Muestreo	25
3.3.2. Descripción	25
3.3.3. Clasificación	25
3.4. Caracterización de los Suelos	26
3.4.1. Análisis Químicos	26
3.4.2. Pruebas Físicas	29
3.4.3. Análisis Mineralógicos	30
4. RESULTADOS Y DISCUSION	32
4.1. Morfología y Clasificación	32
4.1.1. Morfología	32
4.1.2. Clasificación	35

	Pag.
4.2. Propiedades Físicas	36
4.2.1. Textura	36
4.2.2. Otras propiedades físicas	39
4.3. Mineralogía de los Suelos	39
4.3.1. Mineralogía de la fracción arena	41
4.3.2. Mineralogía de Arcillas	41
4.4. Propiedades Químicas	46
4.4.1. Carbono Orgánico	46
4.4.2. pH	48
4.4.3. Carbonatos de Calcio	48
4.4.4. Capacidad de Intercambio de cationes	49
4.4.5. Fósforo Asimilable	50
4.4.6. Boro soluble en agua	50
4.4.7. Boro total	51
4.5. Factores que afectan la disponibilidad de Boro en los suelos estudiados.	52
4.5.1. Mineralogía	53
4.5.2. Materia Orgánica	55
4.5.3. pH y contenido de carbonatos	55
4.5.4. Calcio Intercambiable	56
4.5.5. Boro total	56
4.5.6. Boro soluble en agua caliente	57
4.5.7. Propiedades físicas	58
4.5.7.1. Textura	58
4.5.7.1. Densidad aparente	59

	Pag.
4.5.8. Clima	60
4.6. Fijación de Boro	60
5. CONCLUSIONES	65
6. RESUMEN	67
7. SUMMARY	69
BIBLIOGRAFIA	71
APENDICES	78
Descripción del Perfil 1 (P1)	79
Descripción del Perfil 2 (P2)	81
Descripción del Perfil 3 (P3)	83
Descripción del Perfil 4 (P4)	85

LISTA DE TABLAS

	Pag.
TABLA 1. Concentración de las soluciones de boro para la prueba de adsorción	29
TABLA 2. Características diagnósticas y clasificación de los suelos	37
TABLA 3. Análisis granulométrico	38
TABLA 4. Otras propiedades físicas	40
TABLA 5. Análisis mineralógico de arenas	42
TABLA 6. Mineralogía de la fracción arcilla	43
TABLA 7. Propiedades químicas de los suelos	47
TABLA 8. Principales características de los suelos en relación con disponibilidad de boro	54
TABLA 9. Cantidades de boro extraído después de la incubación y dosis de boro	62

LISTA DE FIGURAS

	Pag.
FIGURA 1. Difractograma de Rayos X de las arcillas del horizonte superficial del suelo P1	44
FIGURA 2. Difractograma de Rayos X de las arcillas del horizonte superficial del suelo P4	45
FIGURA 3. Curvas de fijación de boro	63

1. INTRODUCCION

Hace muchos años se viene afirmando que el Valle del Cauca posee los suelos más fértiles del país y es posible que a esto se deba en parte el que dicha región ha alcanzado el más alto grado de desarrollo agrícola. Sin embargo, recientemente se ha encontrado que factores tanto físicos como químicos afectan desfavorablemente el normal desarrollo de los cultivos. Dentro de éstos se destacan las texturas pesadas, el mal drenaje, pH alcalino debido a la presencia de sodio y/o carbonatos, salinidad, relación Ca/Mg invertida y deficiencias de algunos microelementos.

Entre los elementos menores, el boro parece ser el más limitante para la producción de cultivos tales como frijol, alfalfa, maíz y sorgo (5,17,25). El Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT) ha realizado ensayos tendientes a establecer dosis óptimas económicas, fuentes apropiadas del elemento, métodos de aplicación y niveles críticos de boro tanto en el suelo como en la planta (17); no obstante, aún no se han realizado estudios sobre la posible causa de estas deficiencias.

Una investigación encaminada a establecer los factores que intervienen en la baja disponibilidad del boro en estos suelos es útil porque da base para diagnosticar el problema en otras áreas, ayuda en la formulación de prácticas de fertilización y manejo apropiadas y facilita el control en la aplicación de este elemento que puede alcanzar niveles depresivos en el rendimiento de cultivos.

El objetivo de la presente investigación es detectar la causa o causas de la deficiencia de boro en estos suelos.

2. REVISION DE LITERATURA

2.1. Origen del Boro en el Suelo.

La abundancia cósmica del boro es notablemente pequeña. El cálculo de las cantidades en la corteza terrestre ofrece dificultades debido a que una parte considerable del mismo pasa directamente a la hidrosfera por las emanaciones volcánicas. Por tanto, su abundancia en la litosfera debe ser en realidad mayor que el valor obtenido al analizar las rocas ígneas (43).

2.1.1. Boro en las rocas ígneas

Por lo que respecta a las rocas ígneas, el boro se encuentra principalmente en los minerales formados en los estadios finales de cristalización magmática (43), esto es, en rocas ígneas ácidas, principalmente los granitos y las pegmatitas graníticas en las que se encuentran los minerales turmalina y axinita (13, 43).

La turmalina es un borosilicato, perteneciente al grupo de los ciclosilicatos, formada por anillos de tetraedros de silicio de fórmula general: $(Si_6O_{18})XY_3Al_6(BO_3)_3(OH)_4$, donde Y representa Al^{++} , Fe^{++} , Li^+ , Mg^{++} y X Na^+ o Ca^{++} .

El yacimiento más común de la turmalina es la pegmatita granítica, donde se encuentra asociada con ortoxa, albita, cuarzo y moscovita (13).

La turmalina es un mineral más duro que el cuarzo (dureza 7-7½) peso específico de 3-3,25 (13) y es muy resistente al intemperis

mo (22,50).

La Axinita también pertenece a los ciclosilicatos; tiene dureza de 6 1/2-7 se encuentra en cavidades en el granito y en zonas de contacto rodeando intrusiones graníticas (13). Su fórmula es : -
 $(\text{Si}_4\text{O}_{12})\text{Ca}_2(\text{Fe},\text{Mn})\text{Al}_2(\text{BO}_3)(\text{OH})$.

En la cristalización magmática, minerales como los anfíboles y la biotita, que tienen grupos hidroxílicos en su estructura, pueden incorporar pequeñas cantidades de boro (43).

El contenido de boro en las rocas ígneas varía de 10 ppm en las básicas a 15 en las ácidas (22), pero se han encontrado valores hasta de 60 ppm en algunas rocas ácidas (16).

2.1.2. Boro en los sedimentos

El boro es probablemente el microelemento más afectado por los procesos de redistribución durante la sedimentación. En los sedimentos las cantidades varían entre 3 y 300 ppm (22), siendo el promedio para sedimentos marinos 27 ppm (16).

Ciertas bauxitas, caolinitas, así como los carbonatos son usualmente bajos en boro, mientras que los shales marinos y las rocas arenosas glauconíticas son comúnmente altas (22). El agua de mar tiene un promedio de 5 ppm de boro (16).

Tanto la actividad volcánica como la sedimentación en el mar han originado depósitos naturales de boro, de los cuales los más importantes son los siguientes (4,13,43):

Acido bórico	H_3BO_3
Bórax o tincal	$Na_2B_4O_7 \cdot 10H_2O$
Boracita	$Mg_3B_7O_{13}Cl$
Kernita	$Na_2B_4O_7 \cdot 4H_2O$
Ulexita	$NaCaB_5O_9 \cdot 8H_2O$
Colemanita	$Ca_2B_6O_{11} \cdot 5H_2O$

El ácido bórico se encuentra junto con vapor de agua en las emanaciones volcánicas y en grandes cantidades en algunos depósitos naturales (4).

El bórax es el borato más frecuente en la naturaleza. Se forma por evaporación de lagos salados y como eflorescencia en la superficie de la tierra en regiones áridas. En algunas partes se obtiene en fuentes de aguas termales (4,13).

La boracita aparece asociada con capas de halita, anhidrita y yeso, como uno de los productos formados por evaporación de masas de agua salada (4,13).

La kernita es un mineral raro que solo ha sido encontrado en el Estado de California asociado con el bórax (4,13).

La ulexita se encuentra tanto en regiones áridas como en los litorales y lagos, asociada con bórax (13).

La colemanita se ha encontrado en Alemania relacionada con depósitos lacustres del terciario. También ha sido hallada en varios otros lugares (4,13).

2.2. Formas y cantidades de boro en el suelo

2.2.1. Formas de boro

El boro total del suelo se puede dividir en formas inorgánicas - y orgánicas (16).

2.2.1.1. Formas inorgánicas. Se dividen en:

- .1. Disuelto en la solución del suelo como ácido bórico.
- .2. En forma de boratos solubles.
- .3. Adsorbido sobre las superficies de arcillas, óxidos e hidróxidos de hierro y aluminio.
- .4. Precipitado en compuestos de baja solubilidad en combinación con hierro, aluminio y calcio.
- .5. Como constituyente de minerales primarios, principalmente turmalina.

2.2.1.2. Formas Orgánicas. El boro orgánico se encuentra en forma de ésteres del ácido bórico con compuestos hidroxílicos que se originan en los procesos de transformación de la materia orgánica (9,16,47). El boro orgánico no es disponible para las plantas; para ello es necesaria su mineralización, proceso que es poco conocido (16).

2.2.2. Cantidades de boro en el suelo

Las cantidades de boro total en el suelo son menores que 0.013 - (100 ppm). Algunos estudios indican que varía entre 20 y 200 ppm, siendo el promedio de unas 10 ppm (16,22).

En las regiones húmedas el boro soluble en agua varía de 0.05 a 5 ppm, mientras que el boro disuelto en la solución del suelo como ácido bórico va de 0.01 a 0.1 ppm (16).;

2.3. Reacciones del boro en el suelo

El boro es un elemento con caracter metaloide, siendo su óxido un anhídrido ácido. Solamente en presencia de elementos muy electronegativos, como los halógenos, se comporta como catión con tres valencias positivas (B^{+++}). El anhídrido bórico (B_2O_3) reacciona con el agua, para dar ácido bórico (H_3BO_3). Por otra parte, las sales solubles que contienen Boro como el Bórax, reaccionan con el ácido carbónico del suelo originando ácido bórico (4):



El H_3BO_3 es un ácido muy débil ($PK_{1,9,2}$) cuya disociación en $H_2BO_3^-$ solo reviste importancia a pH superior a 9. Por esto, la forma de boro predominante en la mayoría de los suelos es H_3BO_3 y en el lado alcalino la forma aniónica $H_2BO_3^-$. Muchos autores (14,16,47) consideran en las reacciones la forma $B(OH)_4^-$ en lugar de $H_2BO_3^-$, pero químicamente son iguales.

Las reacciones de boro con los constituyentes del suelo incluyen 1) Absorción de iones borato o moléculas de H_3BO_3 ; 2) precipitación de boratos

insolubles de aluminio, hierro, silicio y calcio; 3) formación de complejos con la materia orgánica; 4) entrada de boro en la estructura de las arcillas (14,22,35,42).

2.3.1. Factores que afectan las Reacciones de Boro en el suelo.

Aunque no se han descubierto completamente los mecanismos que afectan las reacciones del boro en el suelo, se sabe que interviene un gran número de factores.

2.3.1.1. pH. En numerosas investigaciones se ha demostrado que la fijación de boro, llevada a cabo tanto por hidróxidos de hierro y aluminio como por arcillas, aumenta con el pH, presentando un máximo en el rango alcalino (pH aproximadamente entre 8 y 9); y es mínima a pH cercano a 5 (22,38,39,46,47,48).

El boro es retenido principalmente como ión $B(OH)_4^-$ por las cargas positivas de los coloides (16), por lo cual la retención debería ser máxima a pH bajo sin embargo, cuando el medio es ácido el boro se encuentra como H_3BO_3 , forma poco susceptible de ser adsorbida.

A medida que el pH sube la concentración de $B(OH)_4^-$ también aumenta hasta un máximo en que dos factores hacen de nuevo disminuir la fijación: 1) pH superior al punto isoeléctrico de los coloides y por tanto desaparición de las cargas positivas y 2) Alta concentración de iones OH^- que ejercen competencia con los iones

$B(OH)_2^-$ por los sitios de adsorción (21,47).

Por esta razón, las arcillas cuyo punto isoeléctrico se encuentra a pH ácido (aproximadamente 4) son menos hábiles para adsorber boro que hidróxidos de hierro y aluminio que tienen el punto isoeléctrico a pH alcalino (aproximadamente 8.5) (16,47).

- 2.3.1.2. Nivel de Cal. Aunque existe abundante literatura sobre el efecto que tiene la cal en inducir deficiencias de boro (3,22,39,50), parece ser que dicho efecto es principalmente indirecto a través del aumento del pH y de la precipitación de hidróxidos de aluminio y hierro (20,46,47,48).

En cuanto a un efecto directo de la cal o del ión calcio en inducir deficiencias de boro, los resultados obtenidos por los investigadores son contradictorios.

Parks y Shaw (38) al estudiar la solubilidad de varios precipitados de boro encontraron que un aluminosilicato cálcico sintético y una bentonita saturada de calcio fueron los únicos sistemas estudiados en que el contenido total de boro de los precipitados formados a pH 8 fueron insolubles en agua hirviendo.

Okazaki y Chao (37) encontraron que el efecto de $Ca(OH)_2$ en adsorción de boro era mayor que el de $NaOH$; dedujeron que el calcio fue responsable de una mayor adsor-

ción de boro en el suelo. Enunciaron la posibilidad de la formación de boratos de calcio insolubles.

Otros investigadores afirman que el efecto de NaOH es similar al de Ca(OH)_2 ; que el calcio no es requisito para fijación y que los cationes tienen en general poca influencia en este proceso. Un resultado sorprendente fué el obtenido por Parks (39), al encontrar que la cal aplicada antes o simultáneamente con el boro hizo decrecer la capacidad de fijación.

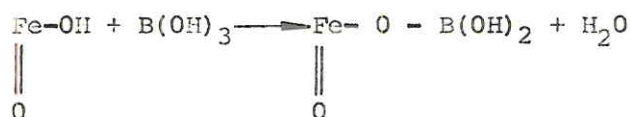
2.3.1.3. Hidróxidos de Hierro y Aluminio

La mayoría de los investigadores que han estudiado la fijación de boro están de acuerdo en que este fenómeno se debe principalmente a los óxidos e hidróxidos de hierro y aluminio. Con relación a este fenómeno se han establecido los siguientes hechos (20,46,47,48):

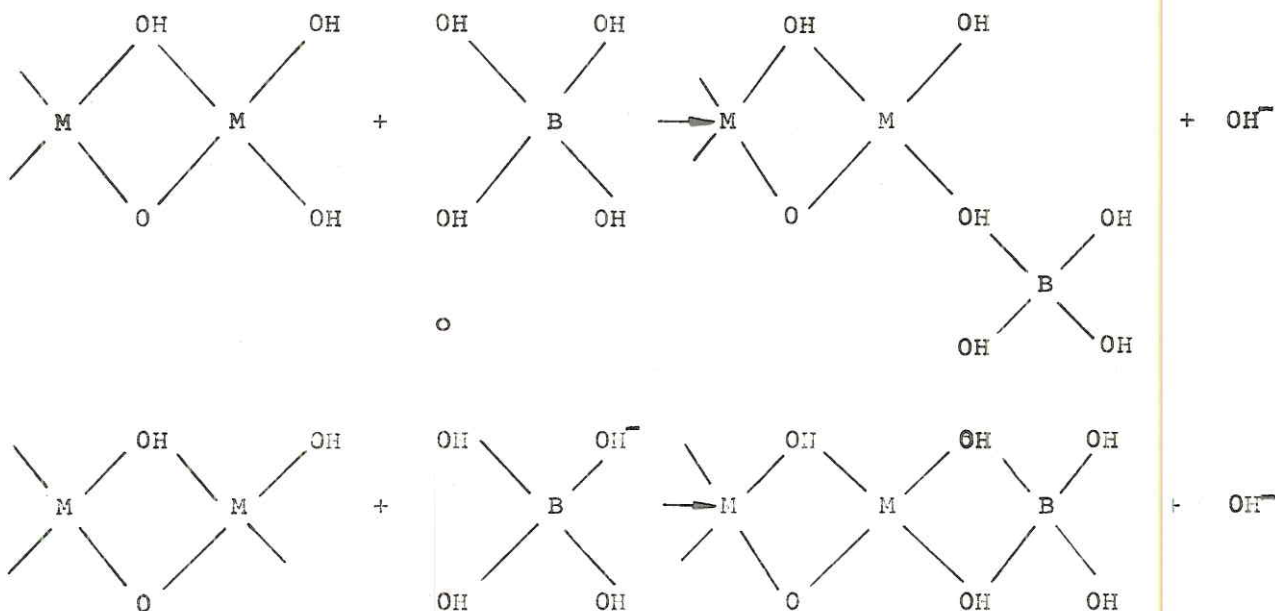
- 1) tanto los hidróxidos de aluminio como los de hierro tiene gran poder para retener boro;
- 2) la retención de boro por aluminio y hierro es altamente dependiente del pH, presentando un máximo al lado alcalino;
- 3) el aluminio tiene más poder para retener boro que el hierro;
- 4) la retención se realiza con más intensidad cuando los hidróxidos están recién precipitados; cuando estos compuestos envejecen pierden poder para retener boro; y

5) el boro retenido cuando el pH es mayor de 9 es liberado con el tiempo, mientras que a pH cercano a 6 permanece fijado.

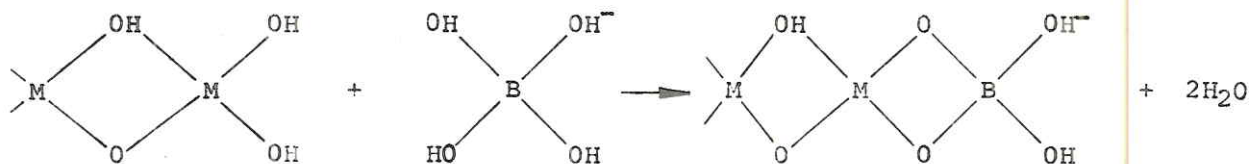
Los mecanismos de la reacción no son bien conocidos; es posible que se deba principalmente a intercambio aniónico, adsorción de moléculas de ácido bórico y a enlaces de hidrógeno (21,47). Fassbender (16) da la siguiente reacción general para explicar la retención de boro por hidróxidos de hierro:



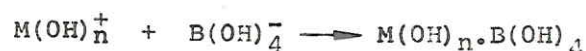
Sims y Bingham (47) explican la fijación por hidróxidos de hierro y aluminio mediante las siguientes ecuaciones:



2) Por eliminación de agua:



Una reacción de simple cambio aniónico puede ser:



en que M representa el hierro o al aluminio. O también:



Las investigaciones llevadas a cabo por Sims y Bingham (47) indican la formación de compuestos de boro con hierro y aluminio de fórmula general MX_n . Los compuestos de Fe formados a pH 6 corresponden a las fórmulas: $Fe_3(B(OH)_4)_4(OH, O)_x$ y $Fe(B(OH)_4)$; y a pH 9 y 11 $Fe_4(B(OH)_4)_3(OH, O)_x$ y $Fe_2(B(OH)_4)(OH, O)_x$ respectivamente. Los datos para compuestos B-Al indican que se forma una amplia variedad de complejos de fórmulas: $Al(B(OH)_4)(OH)_x$, $Al_3(B(OH)_4)_4(OH, O)_x$, $Al(B(OH)_4)_2(OH, O)_x$ y $Al(B(OH)_4)_3$.

2.3.1.4. Arcillas. El estudio de la influencia de las arcillas en las reacciones del boro presenta dificultades debido a que estas no ocurren puras en la naturaleza, sino que generalmente se encuentran contaminadas por óxidos e hidróxidos de hierro y aluminio cuya habilidad para

retener boro es alta.

Sims y Bringham (46) encontraron que vermiculita, caolinita, montmorillonita e hidrobiotita, tienen afinidad por el boro dependiente del pH, presentando un máximo en la alcalinidad. Sin embargo la retención de boro por estos silicatos la atribuyeron a los hidróxidos de hierro y aluminio que ocurren como impurezas en las muestras. Se han encontrado incluso correlaciones entre el área superficial ocupada por hidróxidos y retención de boro (20).

Sims y Bringham (48) estudiaron la retención de boro por caolinita y montmorillonita puras y recubiertas por óxidos de hierro y aluminio, encontrando que las muestras recubiertas por estos óxidos presentan un poder significativamente mayor para retener boro que las arcillas puras. Hallaron además que las arcillas con aluminio retiene más boro que las que contienen hierro.

Se han encontrado diferencias entre los tipos de arcillas para retener boro (14,21,40,46,47,48). Entre las arcillas, aquellas con estructura micácea como vermiculita, tienen mayor habilidad, siendo en general: vermiculita > caolinita > montmorillonita (14).

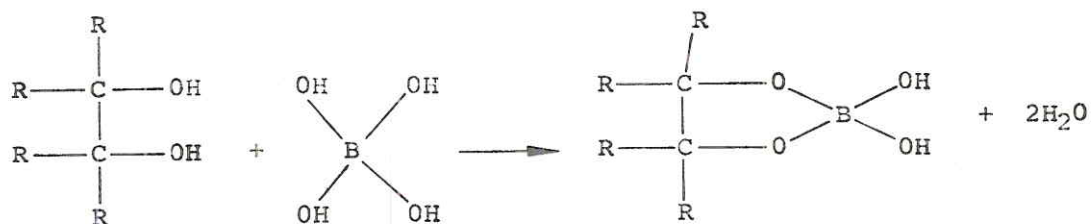
Hingston (21), al estudiar la retención de boro por arcillas a pH 7.5 y relacionar el fenómeno con el área superficial, encontró en microgramos de boro/m² una fi

jación de 1,8 para illita, 0.28 para caolinita y 0.02 para montmorillonita.

Varios investigadores están de acuerdo en que la retención de boro por las arcillas se debe a la entrada del elemento en la estructura cristalina sustituyendo al silicio y aluminio en posiciones tetraédricas (22,38, 39).

2.3.1.5. Materia orgánica. Las reacciones de boro con compuestos orgánicos parece que son menos importantes que con la fracción mineral (48). Es posible que estas reacciones requieran procesos metabólicos poco conocidos (22,47).

La fijación de boro por humus se explica por reacciones con dihidróxi-compuestos de la materia orgánica o aquellos que aparecen como productos intermedios en la descomposición microbiológica de la misma. Se considera que las uniones "diol" de boro con los carbohidratos son responsables de la retención del boro por la materia orgánica (40). La siguiente ecuación dada por Sims y Bringham (47) ilustra esta reacción.



Ecuaciones similares son sugeridas por Corey (40) para

explicar el decrecimiento en solubilidad del boro a pH mayor de 7.

2.3.1.6. Temperatura y Secado. Varios investigadores han encontrado efectos positivos del secamiento del suelo en la retención de boro (38,39,40).

Parks (39) obtuvo variaciones de nada hasta casi 100% de fijación al aumentar el número de ciclos de secado. Este mismo investigador encontró que al aumentar la temperatura de secado de 26 a 35°C la cantidad de boro fijada aumentó casi un 100%. Parks y Shaw (38) sostienen que el secamiento favorece la sustitución de boro por aluminio en la estructura de aluminosilicatos.

2.4. Factores que afectan la Disponibilidad de Boro

La disponibilidad de boro en esencia está afectada por los mismos factores que favorecen su fijación, así como por aquellos relacionados con el material parental, clima, interacciones con otros elementos, materia orgánica y textura del suelo.

2.4.1. pH y Contenido de Carbonatos de Calcio.

Desde hace mucho tiempo se sabe que las deficiencias de boro ocurren principalmente en suelos de pH alto de regiones húmedas, a causa del encalado. Las evidencias muestran que el boro es fijado altamente en suelos alcalinos en presencia de calcio libre, pasando a formas temporalmente inaprovechables por las plantas -

(3,50).

Experimentos llevados a cabo por Fox (18) indican que un alto contenido de calcio acompañado de alto pH hizo disminuir la toma de boro por alfalfa en un 50%, mientras que alto pH o alto contenido de calcio aplicado independientemente no tuvieron efecto. Sin embargo, parece ser que el calcio no bloquea la toma de boro por la planta, sino que por el contrario aumenta los requerimientos de este elemento que, si en el suelo es bajo, aparecen las deficiencias (3,29,44).

Por otra parte, varias investigaciones han demostrado que al encalar el suelo se disminuye la disponibilidad de boro por fijación sobre los hidróxidos de hierro y aluminio recién precipitados (47).

2.4.2. Interacciones de boro con otros elementos.

Aunque puede esperarse que existan interacciones de boro con varios de los nutrientes, las relaciones calcio-boro, potasio-boro y nitrógeno-boro han sido las más estudiadas.

2.4.2.1. Relación Calcio-Boro. Es un hecho bien establecido que en suelos con alto contenido de calcio se presentan por lo general deficiencias de boro. La mayoría de los investigadores que han tratado el tema están de acuerdo en que, cuando el suelo tiene alto contenido de calcio, las plantas absorben mayores cantidades de este elemento, debiéndose aumentar simultáneamente la absor

ción de boro para mantener dentro de la planta cierta proporción; si el boro es bajo en el suelo, la deficiencia se presenta. Esta es otra explicación de las deficiencias de boro que aparecen después de encajar los suelos ácidos (3,29,34,44).

Se ha encontrado relación entre toxicidad de boro y su ministro de calcio. En suelos ricos en calcio se puede aumentar la cantidad de boro sin peligro de alcanzar niveles tóxicos, mientras que en un suelo bajo en calcio, una pequeña dosis de boro puede ser tóxica. Así mismo, cuando los niveles de boro son tóxicos la aplicación de calcio puede disminuir dicha toxicidad, posiblemente por la formación en la planta de compuestos calcio-boro no tóxicos (3,29,44,50).

Los datos presentados indican que las deficiencias de boro en suelos alcalinos no se deben solamente a fijación, sino que ésta se acentúa por un alto nivel de calcio.

Para obtener un desarrollo normal de los cultivos se requiere que exista un equilibrio entre la toma de calcio y boro. En tabaco turco en suelos arenosos se encontró que la relación adecuada es 1.340:1 (3). Jones y Scarseth (29) hallaron las relaciones calcio-boro para tres cultivos, las cuales fueron de 1.200:1 para tabaco, 500:1 para soya y 100:1 para caña de azúcar.

2.4.2.2. Relación Potasio-Boro. Otro factor que ha sido estudiado es la relación potasio-boro. Se han encontrado efectos del potasio similares a los del calcio en cuanto a absorción y requerimientos, pero el potasio no amortigua efectos de toxicidad de boro (3). Parece que la relación potasio-boro es menos importante que calcio-boro.

Reeve and Shive (44) al estudiar el efecto de calcio y potasio en la toma de boro por tomate encontró que los síntomas de deficiencias de boro se acentúan cuando se incrementa el contenido de potasio.

La cantidad de potasio suministrada tiene una definida influencia en la acumulación de boro en la planta. Calcio y potasio tienen un efecto similar en acentuar síntomas de deficiencias de boro. Sin embargo, la toxicidad de boro disminuye con altas cantidades de calcio, siendo contrario el efecto del potasio. Cuando se aumentó el potasio la relación calcio-boro disminuyó marcadamente, mientras que el calcio no tuvo efecto en la relación potasio-boro.

El efecto del calcio sobre el boro es directo, mientras que el del potasio es indirecto a través del efecto que tiene sobre el calcio (3,44).

2.4.2.3. Relación Nitrógeno-Boro. Parece que el boro no solamente es importante en la formación de la pared celular,

sino en la síntesis de proteínas, por lo cual a falta de boro, se presentan acumulaciones de compuestos nitrogenados simples y carbohidratos, presentándose inhabilidad en la planta para completar la síntesis de proteínas. Cuando se presenta toxicidad de boro el porcentaje de proteínas aumenta (3).

2.4.3. Clima.

Aunque se ha encontrado que la disponibilidad de boro se reduce por exceso de cal, las principales áreas con deficiencias están en las regiones húmedas donde los suelos son generalmente ácidos y el contenido es del orden de 0.1 - 2.5 ppm (3).

En regiones de baja precipitación el contenido de boro es alto; en esos suelos probablemente se encuentra como borato de sodio y calcio que son altamente solubles. En zonas áridas, por falta de lavado, se acumulan en el perfil sales de boro de manera que el boro disponible es alto aún en los horizontes inferiores (3).

La cantidad de boro fijado aumenta con el secado del suelo. Walker y otros, citados por Berger (3), observaron que la deficiencia de boro era más severa donde el suelo se secaba más durante el año.

En algunas regiones el factor más importante para que se presenten deficiencias es la sequía. Sin embargo, parece que el efecto de la sequía no es sobre la fijación, sino que en esta época, por una parte disminuye la mineralización de la materia orgánica y

por lo tanto el suministro de boro, y por otra las raíces exploran los horizontes inferiores del perfil donde el boro disponible es bajo (3).

2.4.4. Materia orgánica.

El boro disponible en el suelo se encuentra principalmente asociado a la materia orgánica. Por esta razón los contenidos son mayores en los horizontes superficiales. En las regiones húmedas no se encuentran sales solubles de boro porque son lavadas fácilmente (3).

Existe una correlación positiva directa entre el boro disponible y el porcentaje de materia orgánica en suelos ácidos vírgenes y cultivados. Si la materia orgánica se mantiene constante existe correlación parcial negativa altamente significativa entre el boro disponible y el pH en suelos alcalinos cultivados, lo cual indica que en estos suelos el efecto del pH es mayor que el de materia orgánica, contrario a lo que ocurre en suelos ácidos. Suelos con un pH menor de 7.3 y adecuada materia orgánica contienen generalmente suficiente boro disponible. Todos los suelos con menos de 2% de materia orgánica y altos en carbonato de calcio son invariablemente bajos en boro disponible; esto no es válido en suelos donde la precipitación es limitada (2).

En suelos ácidos la cantidad de boro parece correlacionarse directamente con la materia orgánica del suelo (2). Suelos altos en materia orgánica tienen altos contenidos de boro disponible. En suelos alcalinos, parece que el pH y el contenido de calcio dis-

ponible tienen más efecto sobre la disponibilidad de boro que la materia orgánica (3). A pH superior a 7 es donde se halla la más correlación entre la disponibilidad de boro y pH.

2.4.5. Material Parental.

Aunque el boro es componente de cerca de 56 minerales en las regiones húmedas la turmalina es la única fuente de boro. Este mineral es muy duro, altamente refractario y resistente a la meteorización (3).

Berger y Bruog (1) molieron cristales puros de turmalina y los pasaron por un tamiz de 100 mallas, encontrando que aún con este material los girasoles no podían obtener boro lo suficientemente rápido para seguir creciendo.

Parece razonable que en las regiones húmedas la disponibilidad de boro en el suelo puede estar en una forma distinta a la turmalina, pero a medida que este mineral se descompone el boro se hace disponible. Si el lavado es muy rápido en suelos ácidos o si se encala mucho como para causar fijación, o la remoción por cosechas es alta, el suministro a partir de la turmalina no es tan rápido como para evitar deficiencias en cosechas con altos requerimientos. Si por otra parte, las condiciones que favorecen la disponibilidad de boro son buenas, la cantidad dada por la turmalina será suficiente para el crecimiento de las cosechas (3).

2.4.6. Textura.

El efecto de la textura es menos importante que el de pH o mate-

ria orgánica. Las arcillas tienen poder de retener boro, por lo cual los suelos arenosos son generalmente más bajos en este elemento que los arcillosos (3).

2.4.7. Remoción por Cosechas.

Aunque la remoción de boro por las cosechas no se ha considerado como un factor que induce deficiencias debido a las bajas cantidades extraídas por los cultivos, se puede asegurar que una continua extracción puede con el tiempo incrementar las áreas deficientes en este elemento.

2.5. Deficiencias de Boro en Suelos del Valle del Cauca

La deficiencia de Boro en estos suelos fue reportada en 1961 por Olarte y Motta (36) quienes, en ensayos de invernadero, encontraron buena respuesta a la aplicación de este elemento en varios suelos del Valle del Cauca.

El Programa Nacional de Suelos del ICA (25) reportó que en el Valle del Cauca se han detectado algunas deficiencias de elementos menores, entre los cuales el más limitante es el boro, principalmente para alfalfa.

En el Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT) se observaron respuestas muy significativas a la aplicación de boro en maíz y frijol (5). En ensayos llevados a cabo en este Centro en 1973 y 1974 las respuestas a la aplicación del elemento son espectaculares; los rendimientos promedios para 11 variedades de frijol negro han aumentado de 0.65 a 1.71 ton/ha con aplicación de 1 Kg/ha de Boro (6,7).

Flor y Howeler (17) afirman que en algunas áreas las deficiencias son de tal magnitud que la no aplicación de boro trae un fracaso total en la cosecha.

En la literatura consultada no se encontró información alguna sobre investigaciones realizadas en estos suelos con el fin de detectar la causa de la deficiencia de boro. Por tal motivo parece de gran importancia iniciar una investigación en tal sentido.

3. MATERIALES Y METODOS

3.1. Generalidades de la Zona

3.1.1. Localización

Los suelos seleccionados para el presente trabajo pertenecen al Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT), localizado en el Municipio de Palmira, Departamento del Valle del Cauca, Colombia.

Palmira está situada a $3^{\circ} 31' 44''$ al Norte del Ecuador y a $2^{\circ} - 12' 27''$ al Oeste del Meridiano de Bogotá; su altitud sobre el nivel del mar es 1.006 metros (27).

3.1.2. Clima

Según el sistema de Holdrige, el clima de esta región corresponde al de bosque seco tropical (bs-T), con precipitación de 1.009 mm al año y temperatura promedio de 24°C . En el año se presentan dos épocas secas (Enero-Febrero y Julio-Agosto) y dos lluviosas. La humedad relativa es de 69% (9,15,26).

3.1.3. Geología y Suelos

La mayor parte del piso actual del Valle del Cauca corresponde a depósitos de sedimentos fluviales del Holoceno que rellenaron una antigua cuenca lacustre (54). Estos materiales, en su mayoría de origen ígneo, provienen principalmente de la erosión de las cordilleras central y algo de la occidental.

Las condiciones intempéricas que predominan en la zona, el tipo de material parental y la topografía plana, han favorecido la formación de arcillas de relación 2:1, con pH alto y elevada saturación de bases; presentándose en muchas partes sales solubles y carbonatos de calcio libres.

3.2. Suelos estudiados

Para la presente investigación se seleccionaron 4 sitios de muestreo, con base en los estudios de suelos realizados por el CIAT (49) y por la experiencia que el personal técnico de la misma entidad tiene sobre los lugares donde se han presentado deficiencias de boro; así:

- Perfil 1 (P₁) suelo con deficiencias severas
- Perfil 2 (P₂) suelo con deficiencias severas
- Perfil 3 (P₃) suelo con posibles deficiencias
- Perfil 4 (P₄) suelo donde no se han encontrado deficiencias

Los tres primeros perfiles corresponden a la serie Galpón, la cual es la más extensa del área, con una amplia distribución en la planicie aluvial. Se encuentra en las áreas planas de microrelieve plano-cóncavo y pendientes menores de 3%. Son suelos muy profundos, tractorables en su totalidad, pero requieren drenajes artificiales para su buena utilización. La apreciación textural es pesada (26).

Los perfiles 1 y 2 se localizaron en el lote marcado como S-2 del CIAT (49) y mapeado por Mosquera y otros (26) como Galpón arcilloso, plano, pobremente drenado, salino. En este lote se han presentado las más severas deficiencias de boro y por ello está dedicado a la investigación con este elemento.

El perfil 3 corresponde a Galpón arcilloso, plano, pobremente drenado (26); se localizó en el lote E-2 del CIAT (49). Este lote se seleccionó tentativamente como representante de suelos que, aunque no han mostrado deficiencias de boro, es posible que los cultivos respondan a su aplicación. En este suelo aún no se ha experimentado con este elemento.

El perfil 4 se localizó en el lote F-1 del CIAT y corresponde, según los técnicos de este Instituto, a los mejores suelos de la región (49). Pertenece a la serie Palmeras, arcilloso, plano; localizado en áreas planas o con microrelieve ondulado; la pendiente es menor de 1%. Los suelos son profundos, de excelentes condiciones agronómicas, sin restricciones de ninguna clase y aptos para una gran diversidad de cultivos. La reacción es de neutra a ligeramente alcalina (26).

3.3. Muestreo, Descripción y Clasificación de los suelos

3.3.1. Muestreo

En los sitios seleccionados se procedió a abrir una calicata, en la cual se separaron los horizontes y se tomaron de cada uno de estos, muestras disturbadas y sin disturbar para realizar las pruebas correspondientes.

3.3.2. Descripción de los suelos

Cada perfil fue descrito de acuerdo a las normas del Soil Survey Manual (51) y los horizontes se designaron de acuerdo a las normas del manuscrito del nuevo Soil Survey Manual (19).

3.3.3. Clasificación de los suelos.

Los suelos fueron clasificados de acuerdo al Sistema Taxonómico

Americano (53).

3.4. Caracterización de los Suelos

3.4.1. Análisis Químicos

- 3.4.1.1. Reacción del suelo. El pH se determinó potenciométricamente usando relación 1:1, tanto en agua como en KCl - 1N, (28,45).
- 3.4.1.2. Carbono Orgánico. Se utilizó el método del Walkley Black (45).
- 3.4.1.3. Capacidad de Intercambio catiónico. Se empleó el método del acetato de amonio 1N a pH 7 (28,45).
- 3.4.1.4. Bases Intercambiables. Los cationes intercambiables - Ca^{++} , Mg^{++} , Na^+ y K^+ se extrajeron con acetato de amonio 1N y neutro. El Ca^{++} y Mg^{++} se valoraron con EDTA y Na^+ y K^+ , se cuantificaron por flamometría de llama (45).
- 3.4.1.5. Fósforo Disponible. Se determinó por el método de Bray II (28,45).
- 3.4.1.6. Carbonatos. A 5 g de suelo se agregaron 50 ml de HCl - 0.5N, se hierve suave por 5 minutos, se enfría, - filtra y lava varias veces con agua, y el exceso de ácido se titula con NaOH 0.25 N en presencia de fenolftaleína (45,52).

3.4.1.7. Boro total. El boro total se determinó por el método de la curcumina a partir de la solución obtenida por fusión de la muestra con carbonato sódico (23).

3.4.1.8. Boro disponible. Para su determinación se siguieron dos procedimientos:

1. Método tradicional de extracción con agua caliente y determinación colorimétrica con curcumina (23).
2. Método propuesto por Hunter (24), descrito a continuación.

Reactivos:

1. Solución Extractora. Se disuelven 20.3 gramos de $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ en cerca de 2 litros de agua adicionando 10 ml de HCl concentrado. Se adicionan 0.5 gramos de superfloc-127 disuelto y se lleva a volumen de 10 litros.
2. Curcumina en ácido acético. Se disuelven 0.15 gramos de curcumina en 100 ml de ácido acético glacial y se filtra si la solución no es clara.
3. Mezcla ácida. Se mezcla en proporción 1:1 ácido acético glacial con ácido sulfúrico concentrado.

Extracción de Boro. En un frasco plástico se colocan 10 gramos de suelo y se agregan 20 ml de so

lución extractora. Se agita la mezcla por 10 minutos y se filtra.

Desarrollo de color: Se toma 1 ml del filtrado, se adicionan 3 ml de reactivo 2, se mezcla, se agregan 3 ml de reactivo 3, se mezcla y se deja en reposo por 2 horas, después de lo cual se pasan 2 ml de la mezcla a un tubo de colorímetro y se adicionan 10 ml de etanol o metanol, se mezcla y se deja media hora; después de este tiempo se lee la transmitancia a 555 milimicras. Los resultados se comparan con una curva patrón de boro.

3.4.1.9. Adsorción de boro. Para la determinación de esta característica se siguió la técnica descrita por Hunter(23), detallada a continuación:

Se prepara una solución patrón que contiene 100 ppm de B, disolviendo 0.88 gramos de $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ en un litro de agua. A partir de esta solución se hacen 5 diluciones en balones de 100 ml para obtener las concentraciones que se indican en la Tabla 1.

En frascos plásticos numerados de 1 a 6 se colocan 10 gramos de suelo y 10 ml de las soluciones 1 a 6 respectivamente. Se agita suavemente para lograr mezcla homogénea y se deja en un lugar libre de polvo hasta que el suelo esté completamente seco al aire. Después de esto se extrae y determina boro por los métodos rutina

rios.

TABLA 1. Concentración de las soluciones de boro para la prueba de adsorción

No. Balcón	ml sol. patrón	H ₂ O	Concentración de B obtenido (ppm)
1	0	100	0
2	1	99	1
3	2	98	2
4	5	95	5
5	10	90	10
6	20	80	20

En el presente trabajo la extracción y determinación se hicieron por el método propuesto por Hunter (4) descrito en la sección 3.4.1.8. Los resultados se tabularon y se graficaron las cantidades adicionadas vs las extraídas.

3.4.2. Pruebas físicas

3.4.2.1. Granulometría. La distribución granulométrica de partículas se hizo por el método de la pipeta (45, 2).

3.4.2.2. Densidad Real. Por el método del picnómetro (5).

3.4.2.3. Densidad aparente. Se usó la técnica del tercio empujado hallando el volumen por la diferencia entre el peso en aire y dentro de agua (52). Esta característica se determinó en muestras a capacidad de campo (1/3

de atmósfera) y seca a 105°C.

- 3.4.2.4. Porosidad Total. Esta característica se calculó con base en la densidad real y aparente, usando la siguiente relación (32):

$$P\% = \left(1 - \frac{D_a}{D_r}\right) 100$$

- 3.4.2.5. Retención de Humedad. Para la retención de agua a 1/3 de atmósfera se utilizó una olla de presión y para 15 atmósferas los platos de presión de membrana (32,45,52)

3.4.3. Análisis Mineralógicos

- 3.4.3.1. Mineralogía de Arenas. Las arenas fueron obtenidas durante el análisis granulométrico. Para la identificación se utilizó un gramo de la fracción comprendida entre 50 y 250 micras. La muestra se suspendió en bromoformo (densidad 2.83 g/cc), para separar minerales livianos y pesados, lo cual se hizo en un embudo de separación. Tanto la fracción liviana como la densa se lavaron con alcohol, se secaron y se montaron en preparaciones flotantes con metil salicilato (índice de refracción 1.539). El examen de los minerales en estas preparaciones se hizo en el microscopio petrográfico en base a las propiedades ópticas que cada una de las especies mineralógicas presenta (30).
- 3.4.3.2. Mineralogía de Arcillas. El análisis de arcillas se realizó mediante la técnica de rayos X. La fracción ar

cillosa se obtuvo durante el análisis granulométrico . Una vez separada la arcilla se flocculó con H_2O_2 y se dividió en dos porciones, una de ellas se trató con HCl , se lavó y se usó para preparar tres placas, las que se secaron respectivamente al aire, a $300^{\circ}C$ y a $500^{\circ}C$. Con la otra porción se prepararon dos placas, una se secó al aire y la otra se trató con glicerol.

Las placas fueron analizadas en un aparato de rayos X marca Philips con tubo de cobre de longitud de onda $1,54\text{\AA}$, en el que se obtuvieron los difractogramas correspondientes. Los resultados se interpretaron de acuerdo a los picos característicos de los minerales arcillosos (33,55).

4. RESULTADOS Y DISCUSION

4.1. Morfología y Clasificación

4.1.1. Morfología

A continuación se discuten en forma general las características de los suelos. Las propiedades de los perfiles aparecen en el apéndice.

Los suelos contemplados en el presente estudio son en general de morfología similar, con distribución de horizontes A-B-C que indica que a pesar de su origen aluvial han alcanzado suficiente grado de evolución.

4.1.1.1. Horizontes A. Estos horizontes son en todos los suelos de colores oscuros (10YR2/2 y 10YR3/1), característica que guarda poca relación con el contenido de materia orgánica (Tabla 7); sin embargo, en suelos con predominio de minerales arcillosos tipo 2:1 y alto contenido de calcio, la materia orgánica se encuentra íntimamente mezclada con la parte mineral a través de los complejos arcillo húmicos de alta estabilidad. Además, la presencia de calcio favorece la polimerización de los compuestos orgánicos para formar ácidos húmicos grises (33) de colores oscuros.

El espesor del horizonte A varía entre 38 cm en el perfil número 1 (P1) y 47 cm en el perfil número 3 (P3) - subdividiéndose (menos el P1) en Ap y Ah. A excepción

del perfil 4 (P4) todos los subhorizontes Ap tienen -
contenidos de grava y concreciones del orden de 15% -
por peso que reaccionan con HCl.

La estructura de este horizonte es de bloques subangula-
res en los perfiles P1 y P2, bloques subangulares y gra-
nular en P3, y granular en P4. Esta característica indi-
ca que los suelos representados por los perfiles P3 y
P4 poseen en general condiciones físicas más favorables
para la explotación agrícola, siendo el mejor el P4 don-
de la estructura es fuertemente desarrollada, mientras
en los otros suelos es solo moderada, debido posiblement-
e a que en estos se han realizado mayor número de labo-
res con maquinaria.

4.1.1.2. Horizonte B. En todos los suelos se presentan horizon-
tes transicionales entre el A y el B (BA) que poseen co-
lores pardo grisáceos con manchas de color oliva, par-
do oliva, grises y pardo amarillento.

En los horizontes B (BS) el color es gris oliva en los
perfiles P1 y P2 y oliva en P3 y P4, con manchas gris
muy oscuras, pardo grisáceas y pardas.

Los colores de estos horizontes reflejan condiciones -
de oxidoreducción (mal drenaje) de los suelos pero es-
tán también afectados por la traslocación de materia -
les de A (manchas gris muy oscuras) y por la presencia
de carbonatos de calcio libres.

La estructura de estos horizontes es prismática en los perfiles P1 y P2 y de bloques subangulares en los P3 y P4. Esta característica es el reflejo de el efecto de la expansión y contracción que sufren los suelos P1 y P2, fenómeno que favorece la formación de prismas.

Sin excepción los horizontes B reaccionan fuertemente con HCl, presentando por lo general alta cantidad de concreciones de CaCO_3 .

En los perfiles P1 y P2 se presentan abundantes superficies de fricción (Slickensides) en forma de puñas que se interceptan, indicando que los fenómenos de contracción y expansión arcillosa son muy marcados. Un hecho importante es que el perfil P4, a pesar de ser más arcilloso (véase Tabla 3) no presenta superficies de deslizamiento, explicable posiblemente porque en este suelo se encuentran altas cantidades de clorita y micas, minerales poco expansivos; mientras que la mineralogía de los suelos P1 y P2 está dominada por vermiculita y montmorillonita con alto poder de expansión. Por otra parte, es posible que en el suelo P4 no se hayan presentado condiciones de humedad suficientes para causar la completa expansión arcillosa, no permitiendo el desarrollo de características vérticas.

- 4.1.1.3. Horizontes C. Debajo de los horizontes B se encuentra en general un depósito de materiales sin estructura, de

colores oliváceos manchados, con reacción al HCl, que se denominaron horizontes C. En algunos casos (P1 y P2) el horizonte C se subdividió en varios subhorizontes - (C1, C2, C3).

4.1.2. Clasificación

Para la clasificación de los suelos se tuvieron en cuenta los siguientes criterios diagnósticos (11,53):

- 1) Todos los suelos poseen horizontes superficiales oscuros, de alta saturación de bases, estructurados, con suficiente carbono orgánico y demás características necesarias para un epipedón mólico;
- 2) En la región hay déficit de agua por mas de 90 días acumulativos (9) y sin riego es difícil obtener dos cosechas al año con rendimiento satisfactorios, por lo cual el régimen de humedad de suelo se considera Ustico;
- 3) En los horizontes B de los perfiles P1 y P2 se encuentran abundantes superficies de fricción (Slickensides) en forma de cuñas que evidencian fenómenos drásticos de expansión y contracción arcillosa propia de los Vertisoles, mientras que en el suelo P4 los porcentajes de arcilla tipo 2:1 son mayores del 50%, lo cual indica que hay posibilidades de desarrollo de condiciones vérticas;
- 4) los suelos P1 y P2 tienen una acumulación de 15 cm, con un equivalente de CaCO_3 mayor de 15%, cumpliendo los requisitos para un horizonte cálcico.

En la Tabla 2 se dan las propiedades diagnósticas para los cuatro suelos y la clasificación de acuerdo a estas características.

4.2. Propiedades Físicas.

Estas propiedades fueron determinadas tanto para tener un mejor conocimiento de los suelos estudiados como para reforzar la clasificación de los mismos.

4.2.1. Textura

La distribución de partículas por tamaño y el nombre textural de terminados mediante el análisis granulométrico por el método de la pipeta aparecen en la Tabla 3. En esta tabla también se incluye la textura determinada al tacto como punto de comparación. Es to se hizo principalmente porque el análisis de laboratorio arrojó resultados poco acordes con las observaciones tomadas en el campo.

En condiciones naturales estos suelos se comportan y son de texturas muy finas, predominando las arcillosas y franco arcillosas a través de todo el perfil; sin embargo, al hacer el análisis de laboratorio se hallaron cantidades de limos y arenas finas superiores a las esperadas, razón por la cual las texturas tendieron hacia las franco-limosas y franco arcillo limosas.

Estas diferencias se atribuyen a la presencia de carbonatos que impiden la dispersión de la muestra a través de la acción flocculante del ión calcio, hecho que incrementa el porcentaje de limos y disminuye el de arcillas. Aunque se hizo un tratamiento con HCl

TABLA 2. Características diagnósticas y clasificación de los suelos

Suelo	Epipedón mólico	Horizonte Cálcico	Presencia de Slickensides	Arcillas 2:1 > 50%	Clasificación
P ₁	X	X	X		Vertic Calciustoll
P ₂	X	X	X		Vertic Calciustoll
P ₃	X				Typic Haplustoll
P ₄	X			X	Vertic Haplustoll

TABLA 3. Distribución (%) de partículas por tamaño en milímetros y nombre textural

Perfil	Horizonte	Profundidad cm	A r e n a s						Limos		Arcillas <0.002	Textura per Pipeta al tacto	
			2 - 1	1-0.5	0.5-0.25	0.25-0.1	0.1-0.05	0.05-0.02	0.02-0.002	FArL		FAr	
P1	Ap	0-38	0.59	1.26	2.12	4.20	1.08	19.58	33.47	87.70	FArL	FAr	
	BA	38-57	0.47	1.45	2.08	4.66	9.38	21.86	25.66	34.44	FAr	Ar	
	BS1	57-81	0.73	1.84	2.78	5.09	10.32	27.92	28.20	23.12	FL	Ar	
	BS2	81-95	0.52	1.55	2.21	5.36	12.56	12.20	36.85	28.75	FAr	Ar	
	2-C1	95-110	0.39	1.28	2.22	6.07	13.99	24.04	30.14	21.87	FL	ArA	
	3-C2	110-128	0.01	0.02	0.24	5.99	24.90	22.37	41.40	5.07	FL	F	
	3-C3	128-145X	-	0.02	0.24	1.65	5.44	6.39	43.28	42.98	ArL	FA	
P2	Ap	0-23	5.40	11.76	20.20	21.47	16.97	2.21	5.86	16.13	FA	Ar	
	Ah	23-45	1.41	2.18	3.83	5.49	7.58	29.32	4.80	45.47	Ar	Ar	
	BA	45-59	1.46	2.75	4.42	7.12	9.19	6.14	29.60	39.32	FAr	FAr	
	BS	59-81	2.50	3.69	4.76	6.36	10.55	16.84	23.45	31.85	FAr	Ar	
	BC	81-94	2.66	5.48	7.80	10.89	13.81	16.95	23.63	18.78	F	Ar	
	C1	94-120	4.58	8.05	11.33	13.55	17.10	18.65	17.10	9.64	FA	FA	
	C2	120-140	1.19	2.99	3.21	15.62	34.44	27.72	9.43	5.40	FA	F	
P3	Ap	0-24	0.45	1.08	1.46	2.22	9.27	17.30	39.34	28.88	FArL	Ar	
	Ah	24-47	0.01	0.14	0.21	3.44	9.79	16.05	30.99	31.37	FArL	FAr	
	BA	47-100	-	0.03	1.79	5.63	18.72	22.34	36.10	15.39	FL	ArA	
	BS	100-150	-	0.01	0.11	2.09	9.88	18.77	19.47	49.67	Ar	Ar	
P4	Ap	0-28	0.17	0.27	0.45	0.57	5.15	13.38	28.16	51.85	ArL	ArL	
	Ah	28-43	0.02	0.16	0.28	0.61	2.17	6.14	40.07	50.35	ArL	Ar	
	AB	43-63	0.01	0.03	0.05	0.13	0.91	15.64	17.01	66.22	Ar	Ar	
	BS	63-79	-	-	0.01	0.28	4.25	23.59	15.34	56.53	Ar	Ar	
C	79-150	0.01	0.01	0.02	0.03	0.92	11.24	1.66	86.11	Ar	FAr		

para destruir los carbonatos, es posible que este no haya sido suficientemente efectivo para eliminarlos completamente en los suelos de textura más fina como sucedió en la mayoría de los casos. Por otra parte, el ataque con HCl fué suficiente para destruir partículas de carbonato del tamaño de la arena que se presentan en algunos horizontes, caso en el cual la textura del laboratorio es más fina que la determinada en el campo.

No obstante lo anterior, los suelos en general son de textura fina, lo cual les confiere características pobres en cuanto a drenaje, aireación y mecanización, pero alta capacidad para retener cationes y agua.

4.2.2. Otras propiedades físicas

En la Tabla 4 se dan las características de retención de humedad (capacidad de campo y punto de marchitez), densidad real y aparente y porosidad total de los suelos. Dentro de estas características merece mencionar la densidad aparente la cual presenta valores normales en los suelos P₃ y P₄ y es muy alta, indicando cierto grado de compactación, en los perfiles P₁ y P₂, factor que puede ser un obstáculo físico para el normal desarrollo de las raíces, impidiéndoles explorar un volumen adecuado de suelo.

4.3. Mineralogía de los suelos

En el presente trabajo se determinó la mineralogía de los suelos con el propósito de hallar alguna relación entre deficiencias de boro y el tipo de minerales presentes. Todos los suelos, salvo ligeras diferencias, pre

TABLA 4. Propiedades físicas

Perfil	Horizonte	Profundidad cm	Retención de humedad		Densidad aparente g/cc 1/3 atmósfera seco a 105 °C	Densidad Real g/cc.	Porosidad total %
			0.3 atmósferas	15 atmósferas			
P1	Ap	0-38	35.7	21.6	1.4	2.61	46
	BA	38-57	30.6	16.8	1.4	2.57	46
	BS1	57-81	27.7	14.4	1.5	2.70	44
	BS2	81-95	27.2	14.0	1.5	2.71	45
P2	2-C1	95-110	19.1	10.3	1.4	2.74	49
	3-C2	110-128	17.7	3.5	1.5	2.75	45
	3-C3	128-145	18.3	3.4	1.3	2.75	53
	Ap	0-23	32.9	18.9	1.4	2.62	47
P3	Bh	23-45	34.4	20.1	1.4	2.69	48
	BA	45-59	30.8	16.6	1.5	2.57	42
	BS	59-81	28.0	15.4	1.6	2.72	41
	BC	81-94	22.0	10.8	1.5	2.74	45
P4	C1	94-120	19.9	7.3	1.8	2.76	35
	C2	120-140	14.4	3.8	1.4	2.80	50
	Ap	0-24	37.0	20.8	1.2	2.72	56
	Ah	24-47	35.1	20.1	1.3	2.70	52
P5	BA	47-100	29.7	11.4	1.2	2.64	55
	BS	100-150	34.7	13.6	1.2	2.72	56
	Ap	0-28	40.1	20.7	1.3	2.68	51
	Ah	28-43	37.9	20.4	1.3	2.73	52
P6	AB	43-63	31.7	10.6	1.5	2.83	47
	BS	63-79	27.9	4.7	1.3	2.83	54
P7	C	79-150	36.9	5.0	1.2	2.85	58

sentan una composición mineralógica similar, encontrándose ausente el mineral turmalina considerado como la principal fuente de boro.

4.3.1. Mineralogía de la fracción arena.

En la Tabla 5 se dan los resultados del análisis mineralógico de la fracción arena, separados los minerales en livianos y pesados.

La fracción liviana, que representa la mayor parte de las arenas del suelo (> 90%), se encuentra dominada principalmente por feldespatos, seguidos por cuarzo y en menor proporción por minerales alterados.

La fracción pesada (menos de 10% del total de arena) se encuentra compuesta principalmente por anfíboles (hornblenda) y alterados, con menores cantidades de epidota y titanita; solo en el suelo correspondiente el perfil P₄ se encuentran algunas cantidades de micas. Cabe observar además que el suelo P₄ contiene las menores cantidades de epidota y solo trazas de titanita. Por otra parte, en ninguno de los suelos se encontró turmalina.

4.3.2. Mineralogía de arcillas

En la Tabla 6 aparecen los resultados de el análisis de arcillas de muestras seleccionadas y en las figuras 1 y 2 difractogramas de rayos X de las arcillas del primer horizonte de los perfiles P₁ y P₄. No se considera necesario incluir otros difractogramas por ser similares.

Todas las arcillas de estos suelos son de relación 2:1 y están -

TABLA 5. Mineralogía de la fracción arena.

Perfil	Horizonte	Profundidad cm	Minerales livianos %		Minerales pesados &								
			Quarzo	feldespatos Alterados	Opacos	Alterados	Anfibolos	Epidota	Titanita	Micas			
P1	Ap	0-38	43	48	7	94.1	tr	24	45	20	9	tr	5.9
	BA	38-57	49	38	13	96.1	tr	26	48	19	7	-	3.9
	BS1	57-81	44	44	12	96.0	2	32	43	17	7	-	4.0
	BS2	81-95	48	38	14	93.4	-	24	52	16	7	-	6.6
	2-C1	95-110	42	42	16	98.0	tr	29	44	21	5	tr	2.0
	3-C2	110-128	47	39	14	96.0	-	23	44	12	2	19	4.0
P2	3-C3	128-145	52	38	9	95.5	-	21	56	18	4	tr	4.5
	Ap	0-23	35	62	3	93.8	4	36	38	13	2	2	6.2
	Ah	23-45	37	56	7	94.0	tr	27	49	17	4	-	6.0
	BA	45-59	50	45	5	89.7	tr	41	40	15	2	tr	10.3
	BS	59-81	50	46	4	96.6	tr	37	44	15	4	-	3.4
	BC	81-94	56	42	2	94.0	-	54	30	14	2	-	6.0
P3	C1	94-120	43	40	17	90.7	-	58	30	4	5	3	9.3
	C2	120-140	30	40	30	97.6	-	49	38	9	2	2	2.4
	Ap	0-24	46	42	11	87.6	tr	31	57	16	2	2	12.4
	Ah	24-47	36	49	14	93.7	-	29	52	14	4	tr	6.3
	BA	47-100	43	45	11	89.8	-	28	62	6	1	tr	10.2
	BS	100-150	50	36	14	94.4	tr	32	47	14	3	4	5.6
C	Ap	0-28	21	51	26	91.6	tr	45	42	5	tr	8	8.4
	Ah	28-43	27	50	23	93.5	tr	25	61	9	tr	5	6.5
	AB	43-63	17	35	48	91.9	5	34	58	3	tr	4	8.1
	BS	63-79	15	38	47	95.8	-	38	57	3	-	2	4.2
		79-150	12	9	89	97.8	tr	29	49	5	tr	26	2.2

TABLA 6. Mineralogía de la fracción arcilla en muestra seleccionada.

Perfil	Horizonte	Profundidad	Intergrados	Montmorilonita	Vermiculita	Hidrobiotita	Illita	Clorita	Feldspatos	Cuarzo
P1	Ap	0 - 38	*	+++	+++	**	+++	tr	r	
	BS1	57 - 81	-	++++	**	**	**	*	r	
	2C1	95 - 110	-	++++	*	**	**	**	r	
	3C3	128 - 145	tr	**	**	*	*	tr		
P2	Ap	0 - 23	**	+++	+++	+++	+++	-		
	BA	45 - 59	*	+++	+++	*	**	tr		
	BC	81 - 94	-	++++	+++	*	+++	**		*
	C2	120 - 140	**	+++	*	**	**	**		
P3	Ap	0 - 24	tr	+++	*	+++	+++	+++	r	*
	BA	47 - 100	tr	+++	*	-	**	+++		*
P4	Ap	0 - 28	*	+++	*	**	+++	+++		*
	AB	43 - 63	**	**	*	-	**	+++	r	tr

++++ > 50%

+++ 35 - 50%

** 15 - 35%

* 5 - 15%

tr < 5%

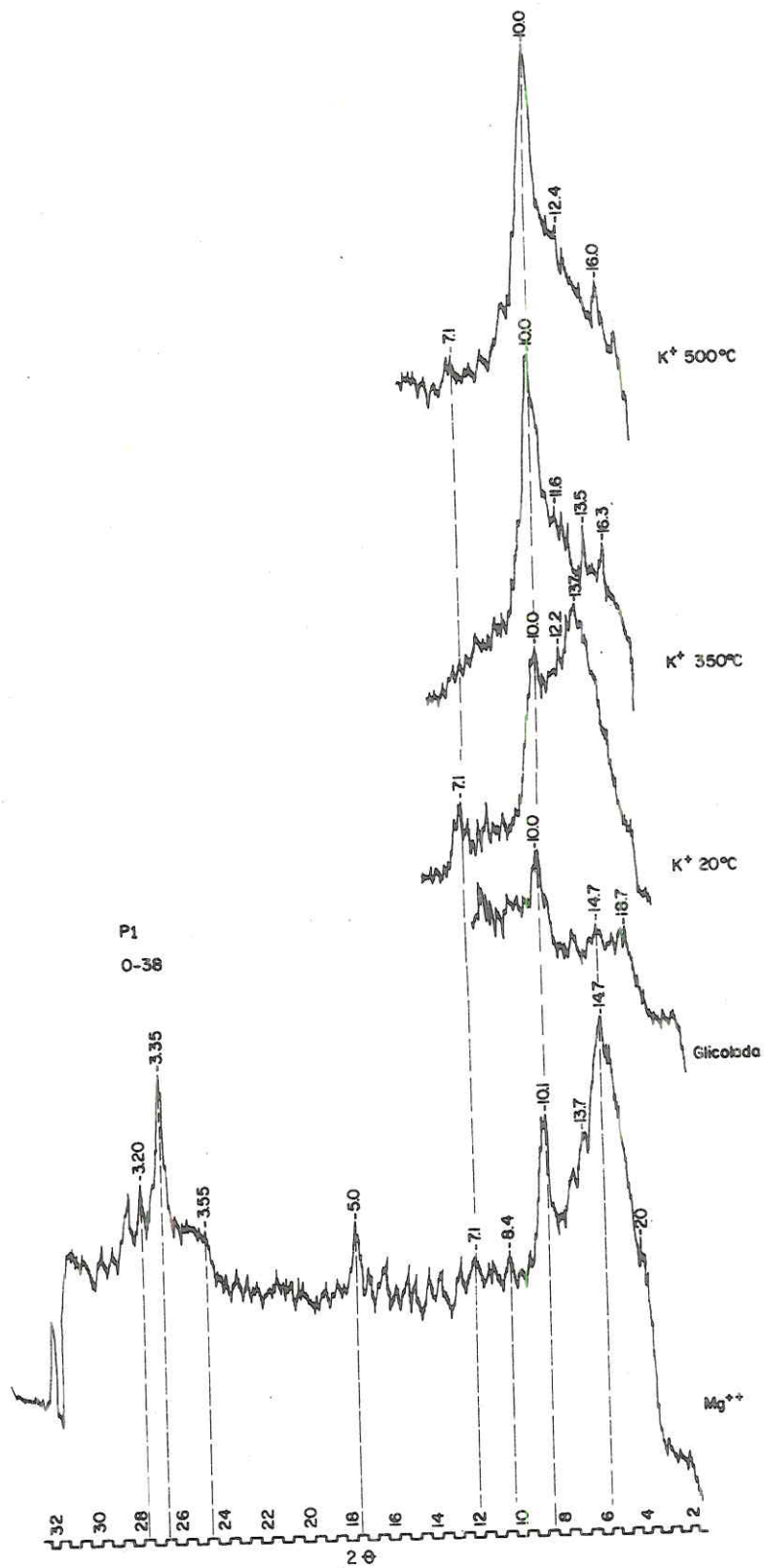


Figura 2 Difractogramas de rayos-x de las arcillas del primer horizonte del Perfil 1, con diferentes tratamientos

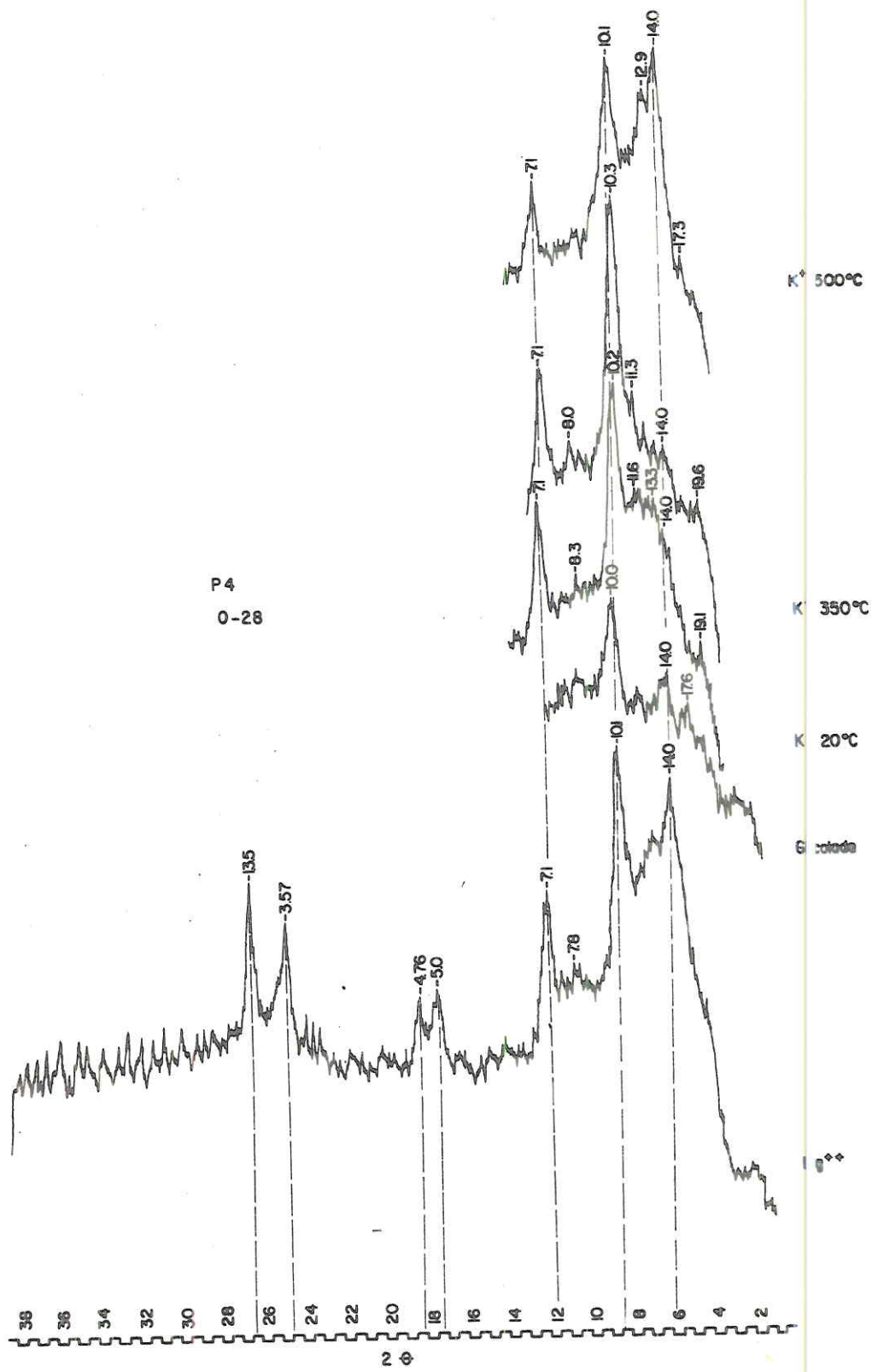


Figura 1 Difractogramas de rayos-x de las arcillas del primer horizonte del Perfil 4 con diferentes tratamientos.

constituídas principalmente por montmorillonita (más del 50%) con menores pero significativas cantidades de illita e hidrómicas. En las muestras correspondientes a los perfiles P₁ y P₂ se encuentran abundantes cantidades de vermiculita, mientras la clorita no está presente. Por otra parte en los perfiles P₃ y P₄ la clorita ocupa una alta proporción (35-50%) mientras la vermiculita solo se halla en pequeñas cantidades.

Es importante observar que ningún suelo tuvo minerales de relación 1:1 como caolinita, hecho que junto con la alta proporción de minerales fácilmente intemperizables en la fracción arena y dominio de montmorillonita en las arcillas, ponen de manifiesto un bajo grado de evolución de los suelos, así como alto potencial de fertilidad.

4.4. Propiedades Químicas

En la Tabla 7 se dan las principales propiedades químicas de los suelos. A continuación se hace una discusión de cada una de ellas.

4.4.1. Carbono orgánico y materia orgánica

En general los contenidos de materia orgánica de estos suelos - puede considerarse altos si se tiene en cuenta el clima de la región. Esta característica puede estar relacionada con la alta estabilidad de los complejos arcilla-humus y por la formación de ácidos húmicos grises (humatos cálcicos) de alta estabilidad(33). Por otra parte, hasta cierto punto también puede haber tenido influencia en esta acumulación el relativo mal drenaje de los sue-

TABLA 7. Propiedades Químicas

Perfil	Horizonte	Profundidad cm	Ca	pH	CaCO ₃ %	C.I.C. me/100g	Bases totales me/100g	Cationes extraídos con AcO-NH ₄ 1M (me/100g)			P ₂ O ₅ Kg/ha	Boro ppm		
								Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Na ⁺		Total	Soluble	
P1	Ap	0-38	1.59	7.3	0.9	32.1	33.8	10.8	21.5	0.5	1.0	133	7.50	0.12
	Ba	38-57	0.33	8.2	4.1	27.9	36.3	11.7	23.3	0.5	0.8	71	13.75	-
	Bs1	57-81	0.20	8.2	6.7	23.1	35.5	12.5	21.5	0.8	0.7	300	-	-
	Bs2	81-95	0.20	8.5	4.1	22.5	31.6	12.1	18.1	0.8	0.6	300	-	-
	2-C1	95-110	0.27	8.6	24.5	14.3	53.7	39.0	13.3	0.9	0.5	30	-	-
	3-C2	110-128	0.20	8.9	13.9	6.5	45.9	40.2	4.6	0.7	0.4	18	-	-
P2	3-C3	128-145X	0.20	8.7	11.3	6.1	45.0	39.8	4.0	0.8	0.4	4	-	-
	Ap	0-23	2.29	7.7	1.2	31.3	44.4	21.9	13.1	0.5	0.9	244	21.00	0.33
	Ah	23-45	1.05	8.1	3.8	32.4	39.3	31.5	16.2	0.8	0.0	54	13.75	0.07
	Ba	45-59	0.33	8.2	2.9	26.3	36.5	19.4	15.6	0.5	0.7	68	-	-
	Bs	59-81	0.27	8.1	3.4	23.5	35.0	20.0	13.5	0.5	0.7	161	-	-
	Bc	81-94	0.20	8.3	7.0	18.8	38.8	29.3	8.2	0.8	0.5	1300	-	-
P3	C1	94-120	0.20	8.4	4.1	12.4	30.9	24.1	5.7	0.7	0.4	271	-	-
	C2	120-140X	0.13	8.3	3.2	7.0	12.3	9.1	2.4	0.4	0.3	202	-	-
	Ap	0-24	2.08	6.6	-	30.8	28.0	18.3	8.3	0.6	0.0	197	7.50	0.34
	Ah	24-47	1.53	6.7	-	29.8	33.0	21.7	10.2	0.6	0.5	62	10.00	0.15
	Ba	47-100	0.33	7.7	1.2	20.4	25.2	15.3	8.9	0.6	0.4	85	-	-
	Bs	100-150	0.33	7.9	3.3	21.7	28.3	16.5	10.7	0.7	0.4	71	-	-
P4	Ap	0-28	3.26	6.5	-	30.2	28.4	13.8	13.3	0.5	0.8	122	141.25	0.31
	Ah	28-63	2.43	7.8	2.7	31.9	37.0	15.8	20.0	0.6	0.6	141	131.25	0.12
	Ab	43-63	0.74	6.4	5.7	13.7	24.8	12.5	11.3	0.6	0.4	115	-	-
	C	79-150	0.27	8.8	5.0	9.9	16.2	10.7	4.6	0.6	0.3	300	-	-

los.

El contenido orgánico en todos los suelos decrece uniformemente con la profundidad. Las cantidades varían desde medio en los perfiles P_1 , P_2 y P_3 a alto en el perfil P_4 . La mayor acumulación en este suelo es posible que se deba al mayor porcentaje de arcilla del mismo, lo cual favorece la acumulación a través de los complejos organo-minerales, hecho que está de acuerdo con la mejor estructuración que presenta el horizonte A.

4.4.2. pH

Los suelos en general tienen pH alcalino como resultado de la alta saturación de bases y ante todo por la presencia de carbonato de calcio. El mayor pH lo presentan los suelos de los perfiles P_1 y P_2 que son alcalinos a través de todo el perfil, mientras que los suelos de los perfiles P_3 y P_4 son de ligeramente ácidos a casi neutros en los horizontes superficiales, y alcalinos en los profundos.

4.4.3. Carbonatos de Calcio

El alto contenido de carbonato de calcio es uno de los aspectos más sobresalientes de estos suelos, especialmente en los perfiles P_1 y P_2 , donde esta característica obligó a clasificarlos como Calciustoll. En los perfiles P_3 y P_4 los contenidos son menores y solo se presentan en los horizontes inferiores. Esta condición está de acuerdo con el pH más bajo de los horizontes superficiales de estos suelos, en los cuales no se encontraron carbonatos

libres.

En general, el contenido de CaCO_3 en todos los suelos se hace mayor con la profundidad. Debe tenerse presente, que los carbonatos se analizaron en el material $< 2 \text{ mm}$, pero que los suelos tienen abundantes cantidades de gravas y concreciones que reaccionan - fuerte con HCl .

4.4.4. Capacidad de intercambio de Cationes (CIC)

Todos los suelos poseen alta capacidad para retener e intercambiar cationes, característica que está de acuerdo con el tipo de arcillas presentes. Es necesario anotar que la CIC debe ser en - realidad mayor que la reportada, teniendo en cuenta que qué determinada por saturación del suelo con el ión NH_4^+ y este es fijado por las arcillas 2:1, disminuyendo por tanto la CIC en forma proporcional a la cantidad de cargas bloqueadas por este ión .

Las bases totales y los contenidos individuales de calcio, magnesio y potasio son altos en todos los suelos. Los horizontes superficiales del perfil P_1 presentan contenidos de magnesio superiores a los de calcio, hecho que puede ocasionar trastornos en la nutrición de las plantas, principalmente en lo que respecta a estos dos iones. El suelo del perfil P_4 presenta este mismo fenómeno pero menos marcado.

Los contenidos de sodio encontrado no ofrecen peligro a las propiedades físicas o químicas del suelo.

4.4.5. Fósforo asimilable

Las cantidades de fósforo determinadas fueron altas en todos los suelos. Se encontró, en general, un mayor contenido en los horizontes superficiales, relacionado seguramente con el mayor aporte de la materia orgánica; luego se presenta una disminución en el perfil para posteriormente sufrir un aumento considerable, asociado posiblemente con la presencia de fosfatos de calcio (apatitas). En general, la dinámica del fósforo en estos suelos debe estar controlada por la actividad de la calcita y por lo tanto los fosfatos presentes son de tipo de las apatitas.

4.4.6. Boro soluble en agua

Parece que existe estrecha relación entre el contenido de materia orgánica y el boro soluble en agua, ya que en ninguno de estos suelos se encontró boro en los horizontes inferiores donde la materia orgánica es baja.

En los horizontes Ap el boro soluble en agua varía desde 0.12 en el perfil P₁ hasta 0.34 en el perfil P₃. En general los suelos P₂, P₃ y P₄ tienen más de 0.3 ppm de B mientras que el P₁ solo presenta 0.12 ppm.

Estos valores pueden ser deficientes para cultivos exigentes en este elemento pero adecuados para cultivos con bajos requerimientos (17).

Sin embargo, en los experimentos realizados por el CIAT en los suelos P₁ y P₂ se han hallado respuestas muy significativas de

fríjol a la aplicación de boro en ambos suelos, lo cual hace pensar que el valor 0.33 del P_2 se debe considerar bajo y que por lo tanto los suelos P_3 y P_4 también son deficientes en este elemento.

Como las plantas cultivadas en el suelo P_4 no han mostrado síntomas de deficiencia, cabe pensar que para considerar un valor crítico no solo es importante la cantidad encontrada, sino otras propiedades de los suelos.

4.4.7. Boro total

Quizá una de las características más sorprendentes y que mejor explican la deficiencia de boro en estos suelos es el contenido total de este elemento. Los valores hallados pueden considerarse como muy bajo en los perfiles P_1 , P_2 y P_3 y altos en el suelo P_4 .

Es indudable que en los tres primeros suelos no hay fuentes primarias de boro que lo liberen, por lo cual las deficiencias deben presentarse. Es pues este, principalmente un problema de carencia casi absoluta del elemento en el material parental.

Como en ninguno de los cuatro suelos se halló turmalina, es obvio que en el suelo P_4 debe haber una fuente del elemento distinta a este mineral.

Analizando detenidamente los resultados de mineralogía, parece que la mayor diferencia mineralógica del suelo P_4 con los otros tres radica en los contenidos de clorita en la fracción arcillosa y micas en las arenas. En los horizontes donde se determinó el

boro total, solo hay pequeñas cantidades de mica en los perfiles P_1 , P_2 y P_3 mientras que el suelo P_4 se encuentran apreciables - cantidades. Por otra parte, la clorita no se encontró en las ar - cillas de los perfiles P_1 y P_2 , mientras que en los perfiles P_3 y P_4 las cantidades están entre 35 y 50%. Es posible que el boro encontrado en el suelo P_4 esté asociado a estos minerales, ocu - pando sitios correspondientes a grupos hidroxílicos de la estruc - tura o dentro del enrejado cristalino, lo cual está de acuerdo - con lo propuesto por Rankama y Sahama (43).

En cierto grado el mayor contenido de boro en el perfil P_4 puede ser atribuido a la mayor cantidad de materia orgánica de este - suelo, lo que está de acuerdo con varios autores como Berger (2), quien sostiene que en suelos de pH menor de 7.3 y adecuada mate - ria orgánica, generalmente contienen alto boro disponible.

4.5. Factores que afectan la disponibilidad de boro en los suelos estudiados.

De acuerdo a los resultados de las observaciones y análisis de los suelos, comentados en las secciones precedentes, a continuación se enumeran y dis - cuten aquellas características que se cree tienen más incidencias en la manifestación de deficiencias de boro en los suelos estudiados. Se hace especial énfasis en los horizontes superficiales por ser en estos donde se presenta una mayor heterogeneidad en las características.

Además, varios factores, como contenido de arcilla, estructura, presen - cia de carbonatos y condiciones reductoras de los horizontes inferiores, determinan que la profundidad efectiva radicular no se extiende hasta - ellos. Por otra parte, los horizontes superficiales tienen un espesor su

ficiente para el desarrollo de las raíces de cultivos anuales.

En la Tabla 8 se reúnen las principales propiedades de dichos horizontes, las que se discuten a continuación.

4.5.1. Mineralogía

A pesar que el cuarzo representa una importante proporción de la fracción arena en los suelos, es necesario tener presente que esta fracción es pequeña ya que hay un amplio predominio de arcillas, por lo cual los contenidos absolutos de este mineral son en realidad bajos. Este hecho, así como la alta proporción de minerales ferromagnesianos, hacen suponer que los sedimentos que originaron estos suelos provienen de rocas ígneas básicas. Esta sin duda es la razón por la que en ninguno de los suelos de encontró turmalina, mineral que aparece principalmente en rocas ígneas graníticas.

Aunque la composición mineralógica de los cuatro suelos es similar, ocurren algunas diferencias incluidas en la Tabla 8, que merecen ser mencionadas.

En los suelos P_1 y P_2 , que son los que presentan deficiencias en boro, se encuentran apreciables cantidades (35-50%) de vermiculita, que es la arcilla con más alto poder de fijación de boro.

En los suelos P_3 y P_4 , donde no se presentan deficiencias del elemento, la vermiculita solo se encuentra en pequeñas cantidades. En estos suelos, por el contrario, ocupan porcentajes importantes, la clorita en ambos suelos, y las micas en P_4 .

TABLE 8. Principales características de los suelos en relación con disponibilidad de boro

Suelo	Horiz.	Prof. cm	Diferencias mineralógicas	C.O. %	CaCO ₃ %	pH	Ca ⁺⁺ me/100g	B Ppm		Text. de campo	Densidad aparente g/cc 1/3 at- mósfera 105°C	
								Total	Soluble			
Vertic Calcustoll (P ₁)	Ap	0-38	Vermiculita	1.6	0.9	7.3	10.8	7.5	0.12	FAR	1.4	1.8
	BA	38-57	Vermiculita	0.3	4.1	8.2	11.7	13.7	0.00	Ar	1.4	1.9
Vertic Calcustoll (P ₂)	Ap	0-23	Vermiculita	2.3	1.2	7.7	21.9	21.0	0.33	Ar	1.4	1.7
	Ah	23-45	Vermiculita	1.0	3.8	8.1	21.5	13.7	0.07	Ar	1.4	1.4
Típico Haplustoll (P ₃)	Ap	0-24	Clorita	2.1	0.0	6.6	18.3	7.5	0.34	Ar	1.2	1.6
	Ah	24-47	Clorita	1.5	0.0	6.7	21.7	10.0	0.15	FAR	1.3	1.6
Vertic Haplustoll (P ₄)	Ap	0-28	Clorita y micas	3.3	0.0	6.5	13.8	141.0	0.31	ArL	1.3	1.5
	Ah	28-43	Clorita y micas	2.4	2.7	7.8	15.8	131.2	0.12	Ar	1.3	1.7

Aunque la literatura no dice nada respecto al poder de la clorita para retener boro, es posible que sea mucho menor que otras arcillas teniendo en cuenta que en esta es más difícil que el boro penetre en los espacios interlaminares ocupados por $Mg_2(OH)_6$.

En esta forma, la composición mineralógica de la fracción arcilla puede estar determinando en gran parte la deficiencia de boro; presentándose el fenómeno allí donde la vermiculita hace parte de las arcillas en proporciones importantes como en P_1 y P_2 .

4.5.2. Materia orgánica

El contenido de materia orgánica parece ser una de las características que más expliquen la baja disponibilidad de boro donde ésta se presenta, ya que el suelo con más agudas deficiencias (P_1) es el que tiene menores contenidos, mientras que el suelo P_4 , sin deficiencias, es alto en este constituyente.

Esta apreciación concuerda con lo sostenido por Berger (2), quien afirma que el boro disponible en el suelo se encuentra principalmente asociado a la materia orgánica, especialmente cuando el pH es inferior a 7.3 como en los suelos P_3 y P_4 . Observese en la Tabla 7 que los horizontes inferiores, donde el contenido de materia orgánica es bajo, el boro disponible es cero.

4.5.3. pH y contenido de carbonato de calcio

Talvez la característica más importante en lo que respecta a inducir deficiencias de boro es el contenido de carbonato de calcio, debido principalmente al alto valor del pH que lo acompaña.

Los suelos P₁ y P₂ contienen apreciables cantidades de CaCO₃, razón por la cual su pH es alcalino (mayor de 7.3), mientras que en los horizontes superficiales de los suelos P₃ y P₄ no se hallaron carbonatos, siendo el pH ligeramente ácido.

El efecto de los carbonatos de calcio sobre la disponibilidad de boro es debido principalmente a una mayor fijación del elemento a pH cercano a 8, hecho que ha sido establecido por numerosos investigadores, algunos de los cuales están de acuerdo en que en la alcalinidad la materia orgánica juega un papel secundario al pH en la disponibilidad de este elemento.

4.5.4. Calcio Intercambiable

Como una consecuencia de la presencia de carbonatos de calcio, el contenido de calcio intercambiable en los suelos es alto y la absorción de este elemento por las plantas debe ser elevada, requiriéndose una mayor concentración de boro disponible en el suelo para que haya un suministro a la planta suficiente para mantener una relación calcio: boro adecuada.

De acuerdo a esta característica, las plantas que crezcan en cualquiera de los suelos estudiados y muchos otros del Valle del Cauca, tendrán altos requerimientos de boro, presentándose deficiencias en aquellos lugares donde la disponibilidad de este elemento sea baja.

4.5.5. Boro Total

Una de las características que más explica la baja disponibilidad

de boro en los suelos deficientes, así como el adecuado suministro en el suelo P_4 , es el contenido total del elemento en el suelo.

Aunque se sabe que el contenido total de un nutrimento no es buen índice de su disponibilidad por estar en su mayor parte en formas insolubles, con el tiempo estas formas van siendo cedidas a la solución del suelo de donde pueden ser tomadas por las plantas.

En esta forma el contenido total del elemento funciona como un depósito (factor capacidad) del cual va pasando gradualmente el elemento a formas asimilables (factor intensidad). En la medida que el factor capacidad sea más elevado, habrá un factor intensidad más adecuado y duradero en el suelo. Evidentemente, de los suelos contemplados en el presente estudio, aquellos en los cuales se presentan deficiencias de boro (P_1 y P_2) y donde es posible que se presenten (P_3), tienen un bajo contenido de boro total (entre 7.5 y 20 ppm) mientras que el suelo P_4 contiene más de 130 ppm del elemento, habiéndose posiblemente un suministro adecuado del mismo.

4.5.6. Boro soluble en agua caliente.

Es un hecho bastante aceptado que el método de determinación de boro que mejor correlaciona con la disponibilidad de este elemento es el de extracción por agua hirviendo.

Teniendo en cuenta que un contenido de 0.3 ppm de B soluble en agua ha sido considerado en estos suelos como crítico (17), los

valores hallados en el presente trabajo son muy bajos para el suelo P_1 y se encuentra en el límite crítico en los otros suelos. Según esto, en el suelo P_1 se presentarían deficiencias y en los otros suelos hay posibilidades de que se presenten en cultivos exigentes en este elemento.

Puede esperarse que suelos con mayor contenido de boro total y más materia orgánica, como el P_4 , el boro tomado por los cultivos sea repuesto rápidamente a partir de las formas insolubles y de la mineralización de la materia orgánica, por lo cual son menos probables las deficiencias.

Las cantidades de boro soluble en agua en estos suelos parece que correlacionan bastante bien con el contenido de materia orgánica, lo cual está de acuerdo con datos reportados en la literatura.

4.5.7. Propiedades Físicas

Para que un suelo produzca buenas cosechas es necesario no solo que exista adecuada cantidad de nutrimentos, sino, también que tenga buenas condiciones físicas que permiten el normal desarrollo de las raíces. Desde este punto de vista son muchas las propiedades físicas que tienen influencia; sin embargo, entre aquellas que se determinaron en el presente trabajo vale la pena mencionar la textura y la densidad aparente.

4.5.7.1. Textura. Esta característica juega un papel importante en la disponibilidad de nutrientes, especialmente por la retención de los mismos contra los agentes que causan lixiviación. Sin embargo, este no es el caso de los suelos estudiados,

donde la baja precipitación es insuficiente para causar lixiviación aún en suelos de texturas más gruesas.

Por esta razón, los altos contenidos arcillosos encontrados y sobre todo el tipo de arcillas, actúan más bien en el sentido de disminuir la disponibilidad de nutrimentos, entre ellos el boro, a través de fenómenos de fijación, característica que es más acentuada cuando el suelo se seca.

Por otra parte el alto contenido de arcillas origina fenómenos drásticos de expansión y contracción que afectan el desarrollo radicular ya sea por impedimento mecánico cuando el suelo se contrae y se endurece, como por mal drenaje y pobre aireación en época de lluvia.

Estos fenómenos son más marcados en los suelos P₁ y P₂, donde se encontraron evidencias de la expansión y contracción de las arcillas y en los que el menor contenido de materia orgánica y pobre estructura, los han favorecido.

4.5.7.2. Densidad Aparente. Una de las características físicas que más afecta el desarrollo radicular y que por lo tanto determina el volumen de suelo explorado por las raíces es la densidad aparente. Los valores de densidad aparente de estos suelos pueden considerarse como altos en los suelos P₁ y P₂ y normales en los suelos P₃ y P₄.

El efecto desfavorable de la densidad aparente alta se vé más marcado a medida que el suelo se seca y se contrae. Por esta razón se han incluido los valores de densidad que presentan los suelos secos a 105°C. Dichos valores indican que en los suelos P₁ y P₂ hay una severa limitación para que las raíces exploren un volumen adecuado de tierra, hecho que repercute en una menor toma de nutrimentos acentuando las deficiencias.

4.5.8. Clima

Esta característica repercute en las deficiencias de boro en la zona, donde se presentan épocas secas muy acentuadas, debido no solamente a que disminuye la mineralización de la materia orgánica, sino también a que las raíces deben explorar los horizontes más profundos donde el boro asimilable es bajo. Simultáneamente se presenta una mayor fijación del elemento debido al secamiento del suelo, y un aumento muy marcado de la densidad aparente, principalmente en los suelos P₁ y P₂, factor que determina suspensión del desarrollo radicular.

4.6. Fijación de boro

Aunque esta característica no se contempló dentro de los objetivos del presente trabajo, se hicieron ensayos de fijación de boro en los primeros horizontes de los suelos con el fin de tener un criterio sobre las cantidades de fertilizante necesario para obtener un nivel adecuado de boro disponible y principalmente para predecir hasta que punto niveles altos de fertilización con este elemento pueden inducir problemas de toxicidad.

Los resultados del ensayo aparecen en la Tabla 9 y Figura 3. Los suelos en general poseen una baja capacidad de fijación de boro, lo cual está de acuerdo a sus características de suelos jóvenes, donde predominan minerales fácilmente intemperizables y la fracción arcilla está dominada por minerales de relación 2:1, no encontrándose caolinita ni óxidos o hidróxidos de hierro y aluminio, los que según la opinión de la mayoría de investigadores son los principales responsables de la fijación de este elemento.

Entre los materiales reportados en la literatura como fijadores de boro, se encontró vermiculita, principalmente en los suelos P₁ y P₂, hecho que posiblemente explique la mayor fijación de boro por estos (ver Figura 3).

Otra característica de los suelos P₁ y P₂ es su pH mayor de 7.3, valores a los cuales se presenta la máxima fijación tanto por óxidos o hidróxidos como por arcillas. Por otra parte estos dos suelos contienen mayor cantidad de carbonatos que favorecen una fijación más alta, pero su efecto es principalmente debido al mayor pH que desarrollan.

Con el método de extracción con fosfato de calcio se supone que el mínimo contenido de boro necesario para considerarlo óptimo es de 0.5 ppm (24). En esta forma el suelo P₁ necesita cerca de 2 ppm, el P₂ 1.2 ppm y P₃ y P₄ aproximadamente 0.5 ppm (Figura 3). Estos valores corresponden aproximadamente en Kg/Ha de boro a 5.3 para el suelo P₁, 3.4 para el suelo P₂ y 0.5 para los suelos P₃ y P₄, teniendo en cuenta la densidad aparente y un espesor de la capa arable de 20 centímetros.

En la Figura 3 se aprecia que una aplicación de 2 ppm puede ser suficiente para el suelo P₁, pero es posible que sea excesiva para plantas que -

TABLA 9. Cantidades de boro extraído después de la incubación con las dosis indicadas de B aplicado.

Suelo	Horizonte	Profundidad (cm)	B agregado en ppm					
			0	1	2	5	10	20
Vertic Calciustoll (P1)	Ap	0-38	0.10	0.20	0.55	3.37	5.00	13.50
	BA	38-57	0.00	0.12	1.25	3.12	3.72	7.85
Vertic Calciustoll (P2)	Ap	0-23	0.10	0.25	1.37	3.87	7.12	13.25
	Ah	23-45	0.00	0.62	1.22	3.57	4.25	14.25
Typic Haplustoll (P3)	Ap	0-24	0.30	1.00	1.62	3.50	7.50	10.00
	Ah	24-47	0.00	0.62	1.25	3.00	7.75	10.00
Vertic Haplustoll (P4)	Ap	0-28	0.25	0.75	1.22	3.00	5.20	12.50
	Ah	28-43	0.50	0.85	1.22	3.00	3.50	8.25

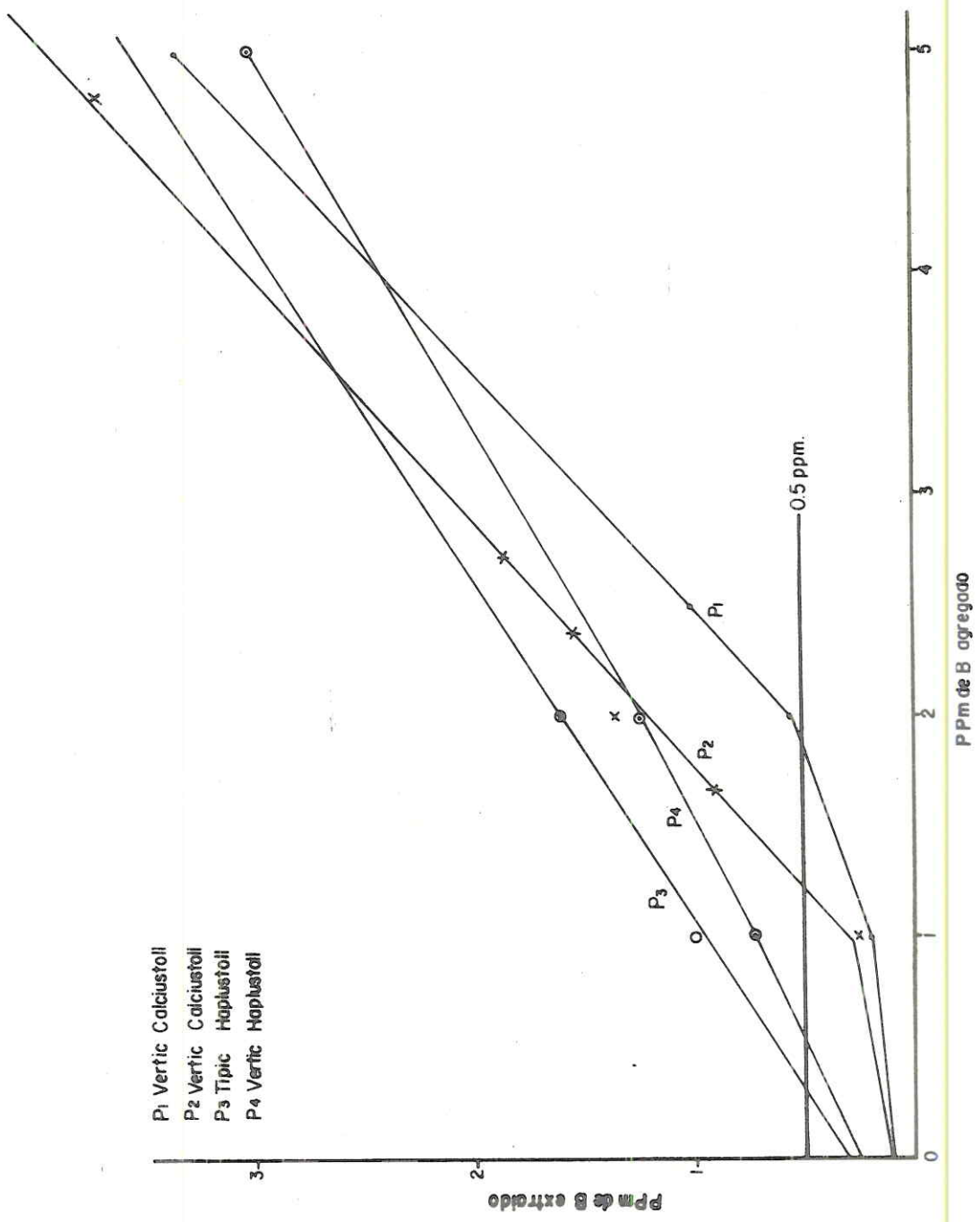


Figura 3 CURVAS DE ADSORCION DE BORO.

crezcan en los otros suelos si a estos se aplica igual cantidad.

En cuanto a niveles tóxicos es necesario tener presente que las plantas varían en la susceptibilidad. Por otra parte el peligro de concentraciones tóxicas se acentúa a medida que el suelo presenta menos contenido de calcio como es el caso de los suelos P₃ y P₄.

5. CONCLUSIONES

1. Las deficiencias de boro en los suelos bajo estudio se encontraron asociadas con las siguientes características químicas:
 - a) Boro soluble en agua menor de 0.3 ppm
 - b) Bajo contenido de boro total (alrededor de 15 ppm)
 - c) Altos contenidos de carbonato de calcio
 - d) pH superior a 7.3
 - e) Bajo contenido de carbón orgánico

2. Como características físicas asociadas con el mismo problema se encontraron:
 - a) Alta densidad aparente (1.4 g/cc o mayor)
 - b) Desarrollo de características vérticas en el perfil

3. Los suelos deficientes en boro presentaron las siguientes características mineralógicas:
 - a) Ausencia de turmalina u otro mineral que aporte boro al suelo
 - b) Alto contenido de arcillas de relación 2:1
 - c) Alta proporción de vermiculita en la fracción arcilla

4. La Taxonomía del suelo puede por sí sola ser un indicio de deficiencias de boro ya que refleja propiedades relacionadas con la baja disponibilidad de este elemento.

5. De los suelos estudiados, los deficientes en boro presentan un mayor poder de fijación de este elemento.

6. Dosis de 3 a 5 Kg/Ha de boro son necesarias para alcanzar un nivel adecuado para la nutrición de las plantas.

7. La fertilización con altas dosis de boro en suelos deficientes, ofrece menos peligro de producir niveles tóxicos para las plantas debido a que estos suelos tienen un mayor poder de fijación del elemento.

6. RESUMEN

Se han reportado deficiencias de boro en los suelos del Valle del Cauca, desde hace varios años; la no aplicación del elemento ha afectado seriamente los rendimientos de cultivos tales como frijol, maíz y alfalfa.

Para estudiar los factores que afectan la disponibilidad de boro en los suelos del Valle del Cauca se seleccionaron cuatro sitios de muestreo en el Centro Internacional de Agricultura Tropical (C I A T) en Palmira (Valle Colombia). En dos de los sitios (P1 y P2) fueron observadas en el pasado severas deficiencias de boro mientras que en los otros 2 sitios (P3 y P4) hay evidencias de un adecuado suplemento.

Los suelos seleccionados fueron descritos, clasificados y muestreados para su caracterización química, física y mineralógica. Se realizó una prueba de fijación de boro en muestras procedentes de los horizontes superficiales para evaluar la cantidad del elemento para un suplemento adecuado y para predecir la posibilidad de alcanzar niveles tóxicos de boro en los suelos.

Se concluyó del estudio, que los suelos deficientes en boro son los Vertic Calciustoll. Estos suelos se caracterizan por contenidos altos de CaCO_3 ; reacción fuerte al HCl; pH mayor de 7,3; abundancia de vermiculita y desarrollo de características vérticas; menos de 2% de carbón orgánico; menos de 0.3 ppm de boro soluble en agua caliente; contenido bajo de boro total (10 a 15 ppm); ausencia de turmalina u otro mineral portador de boro; el suelo tiene una profundidad efectiva limitada debido a un horizonte B arcilloso el cual tiene, además, propiedades vérticas y alta densidad aparente.

En adición, éstos suelos presentan una alta fijación de boro

y por consiguiente hay pocas posibilidades de alcanzar niveles tóxicos cuando se agrega el elemento al suelo. Parece que 5.0 y 3.5 Kg/ha son cantidades correctas para obtener un buen nivel de disponibilidad de boro en los suelos P1 y P2.

Los suelos no deficientes en boro corresponden a los Vertic-Haplustolls y a los Typic Haplustoll; éstos suelos no tienen CaCO_3 en los horizontes superficiales; su pH es ligeramente ácido (6.5-6.6); la vermiculita es escasa pero hay altas cantidades de clorita en la fracción arcilla; el contenido de materia orgánica es mayor de 2%; el boro soluble es más alto que 0.3 ppm y el boro total es generalmente alto (P4 tiene 140 ppm); la densidad aparente, que es menor de 1.3 g/cc y las características vérticas no son factores limitantes para el crecimiento de las raíces. La fijación de boro es menor en los suelos P3 y P4 que en los suelos P1 y P2 y por consiguiente la posibilidad de alcanzar niveles tóxicos de boro es alta.

7. SUMMARY

Boron deficiencies have been reported in the Cauca Valley Soils since several years ago; the lack of addition of the element has seriously affected the yield of crops such as beans, corn and alfalfa.

Four sampling sites were selected at International Center of Tropical Agriculture (CIAT) in Palmira (Valle, Colombia) to study the factor that affect boron availability in Cauca Valley Soils. In two of the sites (P1 and P2) severe deficiencies of boron were observed in the past and in the other two sites (P3 and P4) there are evidences of an adequate boron supply.

The selected soils were described, classified, and sampled for chemical, physical and mineralogical characterization. A test of boron fixation was carried out in samples from the surface horizons to assess the amount of the element for an adequate supply and to predict the possibility of getting toxic levels of boron in the soils.

It was concluded from the study that the boron deficient soils are the Vertic Calciustolls. These soils are characterized by a high amount of CaCO_3 , strong reaction to the HCl, pH higher than 7.3, abundance of vermiculite and development of vertic properties, less than 2% of organic carbon, less than 0.3 ppm of hot water soluble boron, low content of total boron (10 to 15 ppm); lack of tourmaline or other boron-bearing minerals; the soil has a limited effective depth due to a clayed B horizon which in addition has vertic properties and a high bulk density.

In addition, these soils present a high boron fixation and therefore there are few possibilities of getting toxic levels when the element

is added to the soil. It seems that 5.0 and 3.5 Kg/ha are the right quantities to obtain a good level of available boron in the soils P1 and P2.

The boron non-deficient soils correspond to the Vertic Haplustolls and Typic Haplustolls; these soils do not have CaCO_3 in the surface horizons, the pH is slightly acid (6.5-6.6); there is scanty vermiculite and large amounts of chlorite in the clay fraction; the organic matter content is higher - than 2%, the soluble boron is higher than 0.3 ppm and the total boron is generally high (P4 has 140 ppm); bulk density which is less than 1.3 g/cc and vertic characteristics are not limiting factors for root growth. The boron fixation is less in soils P3 and P4 than in the soils P1 and P2 and therefore the possibility of getting toxic levels of boron is high.

BIBLIOGRAFIA

1. BERGER, K.C. and TROUG, E. Boron deficiencies as revealed by plant and - soil tests. *Journal Am.Soc.Agron.* 32: 297-301. 1940.
2. _____. and TROUG, E. Boron availability in relation to soil reaction and organic matter content. *Soil Science Society American Proceedings* 10: 113-116. 1945.
3. _____. Boron in soils and crops. *Advances in Agronomy.* 1: 321-351 . 1949.
4. BRUNI, G. *Química Inorgánica.* Traducida por Fernando Fernández. 12. ed. Barcelona, Uteha, 1964. pp. 62-64.
5. CENTRO INTERNACIONAL DE AGRICULTURA TROPICAL. Informe Anual. Cali, 1972. pp. 108-109.
6. _____. Informe Anual. Cali, 1973. pp. 171-174, 211-212.
7. _____. Informe Anual. Cali, 1974. pp. 153-155.
8. CHAPMAN, H.D. and PRATT, P.E. *Methods of Analysis for soils, plants and waters.* Riverside, University of California, 1961. 309 p.
9. CHAVERRA, G.H. e IBARRA, A. *Generalidades del clima en Colombia.* Bogotá, Universidad Nacional, ICA., 1971. s.p. (mimeografiado).
10. COREY, R.B. *Química de los Elementos Menores.* Chapingo, México, Escuela Nacional de Agricultura, Colegio de Post-graduados, 1968. pp. 69-79 (mimeografiado).

11. CORTES, L.A. Sistema Taxonómico Americano; Criterios para la clasificación de los suelos en las categorías superiores. Bogotá, CIAF, 1972. 55 p. (mimeografiado).
12. COX, F.R. and KAMPATH, E.J. Micronutrients soil tests. In Micronutrients in Agriculture. Madison, Wisconsin, Soil Science Society of America, 1972. pp. 309-313.
13. DANA, H. Manual de Mineralogía. 2. ed. Barcelona, Reverté, 1960. pp. 357-361, 421-429.
14. ELLIS, B.G. and KNEZEK, B.D. Adsorption Reactions of Micronutrients in Soils, In Micronutrients in Agriculture. Madison, Wisconsin, Soil Science Society of America, 1972. pp. 59-75.
15. ESPINAL, T., L.S. y MONENEGRO, M.E. Formaciones Vegetales de Colombia. Bogotá, Instituto Geográfico Agustín Codazzi, 1963. pp. 52-68.
16. FASSBENDER, H.W. Química de Suelos. Turrialba, Costa Rica, IICA, 1975. pp. 362-365.
17. FLOR, C.A. y HOWELER, R. Zinc y boro : dos microelementos limitativos para la producción de algunas cosechas en las regiones cálidas de Colombia. Cali, CIAT, 1975. 23 p. (mimeografiado).
18. FOX, R.H. The effect of calcium and pH on boron uptake from high concentrations of boron by cotton and alfalfa. Soil Science 106(6):435-439. 1968.

19. GARCIA, S.A. Nueva Nomenclatura de Horizontes; Resumen. Traducción del borrador del Nuevo Soil Survey Manual. Bogotá, Instituto Geográfico Agustín Codazzi, 1974. 17 p. (mimeografiado).
20. HATCHER, JOHN T., BOWER, C.A. and CLARK, M. Adsorption of Boron by Soils as influenced by hidroxyl aluminum and surface area. Soil Science 104 (6): 422-426. 1967.
21. HINGSTON, F.J. Reactions between boron and clays. Aust. J. Soil Res. 2: 83-95. 1964.
22. HODSON, J. Chemistry of the micronutrient elements in soils. Advances in Agronomy. 15: 119-159. 1963.
23. HUNTER, A.H. Laboratory and Geenhouse technique for nutrient survey plant growth. North Carolina State University, 1975. 18 p. (mimeografiado).
24. _____. Proposed, Methods for sulfur and boron in soils. North Carolina, State University, 1975. 3 p. (mimeografiado).
25. INSTITUTO COLOMBIANO AGROPECUARIO, PROGRAMA NACIONAL DE SUELOS. Informe Anual de Progreso. Bogotá, 1971. pp. 107-108.
26. INSTITUTO GEOGRAFICO AGUSTIN CODAZZI. Estudio detallado de suelos, para fines agrícolas, del sector plano de los municipios de Ginebra, Guacari, Cerrito y Palmira. Bogotá, 1969. 289 p.
27. _____. Diccionario Geográfico de Colombia. Bogotá, Andes, 1971. Tomo 2, 1447 p.

28. JACKSON, M.L. Análisis Químico de Suelos. Traducido por José Beltrán .
2. ed. Barcelona, Omega, 1970. 662 p.
29. JONES, H.E. and SCARSETH, G.D. The calcium-boron balance in plants as re-
lated to boron needs. Soil Science. 57: 15-24. 1944.
30. KERR, P.F. Mineralogía Optica. 3. ed. New York, MacGraw-Hill, 1965. -
433 p.
31. KRAUSKOPE, C.B. Geochemistry of Micronutrients. In Micronutrients in A-
griculture. Madison, Wisconsin, Soil Science Society of America, -
1972. pp. 8-13.
32. MALAGON, C.D. Propiedades Físicas de los Suelos. Bogotá, Instituto Geo-
gráfico Agustín Codazzi, 1974. 343 p.
33. _____. Mineralogía de Suelos. Bogotá, Instituto Geográfico Agustín -
Codazzi, 1975. pp. 401-440.
34. MARSCH, R.F. and SHIVE, J.W. Boron as a factor in the calcium metabolism
of the corn plant. Soil Science. 51: 141-151. 1941.
35. MORTVEDT, J. and CUNNINGHAM, H.G. Production, Marketing, and use of other
secondary and micronutrient fertilizers. In Fertilizer Technology -
and use. 2. ed. Madison, Wisconsin, Soil Science Society of América,
1971. pp. 413-453.
36. CLARTE, L.I. y MONTA, B. Deficiencias de Boro en algunos suelos del Valle
del Cauca. Bogotá, Instituto Geográfico Agustín Codazzi, 1961. 27 p.

37. OKAZAKI, E. and CHAO, T.H. Boron Adsorption and desorption by some Hawaiian Soils. *Soils Science*. 105(4): 255-259. 1968.
38. PARKS, R.Q. and SPAW, B. Possible mechanisms of boron fixation in soil . I. Chemical. *Soil Science Society American Proceeding* 6: 219-223. - 1942.
39. _____. The fixation of added Boron by dunkirk fine sandy loam. *Soil Science* 57: 405-416. 1944.
40. PARKS, W.L. and WHITE, J.L. Boron retention by clay and humus systems saturated with various cations. *Soil Science Society American Proceedings* 16: 298-300. 1952.
41. PEREZ, M.J. *Análisis Mineralógico de Arenas*. Madrid, Alonso de Herrera, 1965. 265 p.
42. PHILIPSON, T. Boron in plant and soil; With special regard to Sevedish - agriculture. *Acta Agr. Scand.* 3: 121-124. 1953.
43. RANKAMA, K. y SAHANA, Mh. C. *Geoquímica*. 2. ed. Málaga, Aguilar, 1962. pp. 451-460.
44. REEVE, E. and SHIVE, J.W. Potassium-boron and calcium-boron relationships in plant nutrition. *Soil Science*. 57(1): 1-14. 1944.
45. SILVA, M.F.; OLARTE, R.L.I. y MOTTA DE MUÑOZ, B. *Métodos Analíticos del del Laboratorio de Suelos*. 3. ed. Bogotá, Instituto Geográfico Agustín Codazzi, 1973. 173 p.

46. SIMS, J.R. and BINGHAM, F.T. Retention of boron by layer silicates, sesquióxides and soil material : I. Layer silicates. Soil Science Society American Proceedings. 31: 728-732. 1967.
47. _____. Retention of Boron by layer silicates, sesquióxides, and soil materials: II. Sesquióxides. Soil Science. Society American Proceedings 32: 364-369. 1968.
48. _____. Retention of boron by Layer Silicates, Sesquioxides, and soil materials: Iron-and aluminum - Coated Layer Silicates. and soil materials. Soil Science Society American Proceedings. 32: 369-373. 1968.
49. SPAIN, J.M. y HOWLER, R.H. Análisis de Suelos del Centro Internacional de Agricultura Tropical. Palmira, CIAT, 1974. 24 p.
50. TISDALE, S.L. y NELSON, W.L. Fertilidad de los suelos y Fertilizantes. Traducción de Jorge Balasch y Carmen Piña. Barcelona, Montaner y Si^{mon}, 1970. pp. 334-342.
51. U.S. DEPARTMENT AGRICULTURE. Manual de Levantamiento de Suelos. Traducción de Juan B. Castillo. Caracas, Ministerio de Agricultura y Cría, 1965. pp. 169-359.
52. _____. SOIL SURVEY LABORATORY. Methods and procedures for collecting soil Samples. Washington, D.C., 1972. 90 p.
53. _____. SOIL SURVEY STAFF. Soil Taxonomy. Washington, D.C., 1973.
54. VAN-ES, E. El desarrollo Geológico Geomorfológico del Valle del Cauca - y las pendientes adyacentes. Bogotá, Centro Interamericano de Foto interpretación, 1970. 19 p. (mimeografiado).

55. WHITTING, L.D. X-Ray Diffractions Techniques of Mineral Identification -
and Mineralogical Composition. In Black, C.A., ed. Methods of Soil -
Analysis. Madison, Wisconsin, American Society of Agronomy, 1965. -
pp. 671-696.

A P E N D I C E S

PERFIL No.1

Localización: Lote S-2

Profundidad efectiva: Muy profunda

Drenaje natural: Moderadamente bien drenado

Relieve: Plano con pendiente 0-1%

Descripción

- 00 - 38 cm Pardo muy oscuro (10YR2/2); arcilloso, estructura en bloques subangulares, medios y finos, moderadamente desarrollados; consistencia dura, firme, pegajosa y plástica; poros frecuentes, medios y finos en forma visicular y con orientación caótica ; pocas lombrices, raíces y raicillas frecuentes; límite gradual y plano.
- Ap
- 38 - 57 cm Gris oliva (5Y4/2); y pardo grisáceo (2.5Y4/2) en seco, con manchas en forma de playas sobre la cara de los agregados de color gris muy oscuro (5Y4/1); arcilloso; estructura en prismas, medios y moderadamente desarrollados; consistencia firme, plástica y pegajosa; frecuentes poros finos de forma tubular; se observan frecuentes Slickenside en forma de cuñas que se interceptan; pocos macroorganismos; no hay raíces ni raicillas; límite gradual y plano.
- BA
- 51 - 81 cm Gris oliva (5Y5/2); con pocas manchas pequeñas y nítidas de color pardo oliva claro (2.5Y4/4); el color de la matriz en seco se torna pardo grisáceo oscuro (2.5Y4/4); arcilloso; estructura en prismas, medios y moderados; consistencia firme, pegajosa y plástica; frecuentes poros finos tubulares y contí
- BS-1

nuos; frecuentemente (Slickenside) grandes superficies de deslizamientos; no hay macroorganismos; no hay raíces ni raicillas; límite gradual y plano.

- 81 - 95 cm
BS-2
Gris oliva (5Y5/2); con pocas pequeñas manchas netas y de color gris oscuro (7.5YR3/0) y otras en forma de chorreaduras de color pardo grisáceo muy oscuro (10YR3/2); arcilloso; estructura en prismas medios y moderados que fragmentan en bloques subangulares medios y moderados; consistencia firme a friable, pegajosa y plástica; frecuentes poros finos y tubulares; frecuentes Slickenside; no hay macroorganismos, no hay raíces ni raicillas.
- 95 - 110 cm
2-C1
Horizonte endurecido con fuerte reacción al HCl, de color gris a gris claro con chorreaduras de color pardo grisáceo muy oscuro (10YR3/2) y otras más grandes y prominentes de color pardo amarillento claro (10YR6/4); límite gradual y plano.
- 110 - 128 cm
3-C2
Amarillo oliva (5Y6/8) con chorreaduras pardas grisáceas muy oscuras (10YR3/2) y manchas amarillas pálidas (5Y7/3) grandes y prominentes; franco-arenoso; estructura en bloques subangulares, finos y medios muy débilmente desarrollados; consistencia muy friable, no pegajosa y no plástica, frecuentes poros finos, tubulares y verticales; concreciones que reaccionan fuertemente al HCl; no hay macroorganismos, no hay raíces ni raicillas; límite gradual y ligeramente ondulado.
- 128 - 145X cm
Amarillo oliva (5Y6/6) con grandes manchas prominentes de co

3-C3 lor oliva claro (5Y5/4) y otras de color amarillo pálido -
 (5Y7/3) grandes a medios y prominentes; franco-arenoso; estructura en bloques subangulares finos a medios y muy débilmente desarrollados; consistencia muy friable, no pegajosa y no plástica; frecuentes poros finos y vesiculares; pedonódulos con fuerte reacción al HCl; no hay macroorganismos no hay raíces ni raicillas.

PERFIL No.2

Profundidad efectiva: Profundo

Drenaje natural: Moderadamente bien drenado

Relieve: Plano con pendiente 0-1%

Descripción

00 - 23 cm Gris muy oscuro (10YR3/1); y gris (10YR5/1) en seco gravillas de cuarzo en 3%; arcilloso; estructura en bloques subangulares medio y finos moderadamente bien desarrollados; consistencia - dura, firme, pegajosa y ligeramente plástica; frecuentes poros grandes tubulares; regular presencia de lombrices, pocas raíces y raicillas; reacción ligera de la masa al HCl; límite gradual y plano.

23 - 45 cm Gris muy oscuro (10YR3/1), en seco el color se torna gris - (10YR5/1); gravillas en 3%; arcilloso; estructura en bloques subangulares gruesos, moderadamente bien desarrollados; consistencia dura, firme; ligeramente plástica y pegajosa; frecuentes poros grandes y medios, continuos y verticales; no hay macroorganismos, pocas raíces y raicillas; las masas del suelo

- reaccionan ligeramente al HCl; límite gradual y plano.
- 45 -- 59 cm
BA Pardo grisáceo muy oscuro (2.5Y3/2) húmedo, con frecuentes manchas pequeñas, nítidas de color oliva (5Y5/3); arcilloso; estructura en prismas medios y moderadamente bien desarrollados; consistencia dura, firme, pegajosa y plástica; frecuentes poros medios y finos de forma tubular; frecuentes Slickensides que se interceptan en formas de cuñas; no hay macroorganismos no hay raíces ni raicillas; fuerte reacción al HCl de la masa del suelo; límite gradual y plano.
- 59 - 81 cm
Bs Gris oliva (5Y4/2) húmedo; con manchas en forma de playas sobre las caras de los pedos de color gris muy oscuro (5Y3/1) húmedo); arcillosa, estructura en prismas medios y moderadamente desarrollados; consistencia dura, firme, pegajosa y plástica; frecuentes poros medios finos y gruesos, estos últimos rellenos de material proveniente de los horizontes superiores; abundantes Slickensides que se interceptan; no hay macroorganismos; no hay raíces ni raicillas; reacción fuerte al HCl de la masa del suelo; límite gradual y plano.
- 81 - 94 cm
BC Rojo amarillento (5YR4/8) húmedo, con pequeñas manchas (40%) nítidas de color oliva (5Y5/4) y otras grandes y nítidas en forma de playas de color gris muy oscuro (5Y3/1); arcilloso; estructura en bloques subangulares, medios y gruesos moderadamente bien desarrollados; consistencia firme, ligeramente pegajoso y ligeramente plástico; frecuentes poros gruesos, medios finos de forma irregular se encuentran gravillas de 10 a 5 m.m

de diámetro; no hay macroorganismos no hay raíces ni raicillas; fuerte reacción al HCl de la masa del suelo; límite gradual y casi plano.

94 - 120 cm
C1
Pardo amarillento (5Y4/3) y pequeñas manchas en cantidad frecuente, y nítidas de color pardo amarillento (10YR5/8) y pardo amarillento claro (10YR6/4); franco arcillo-arenoso; casi masiva; ligeramente pegajosa y plástica; pocos poros finos irregulares; presencia de gravillas y concreciones con reacción fuerte al HCl; no hay macroorganismos y no hay raicillas; límite gradual y casi plano.

120 - 140 cm
C2
Pardo oliva claro (2.5Y5/6) húmedo, con frecuentes manchas, medias a grandes, nítidas de color pardo a pardo oscuro (7.5YR4/4) y otras manchas localizadas, al parecer de manganeso, de color negro (10YR2/1); arenoso; de aspecto masivo, no pegajosa y no plástica; concreciones que reaccionan fuertemente al HCl a igual que la masa del suelo; no hay macroorganismos y no hay raíces ni raicillas.

PERFIL No. 3

Profundidad efectiva: Muy profundo

Drenaje natural: Bien drenado

Relieve: Plano con pendiente 0-1%

Descripción

00 - 24 cm
Ap
Gris muy oscuro (10YR3/1) húmedo, que se torna cuando seco en gris (10YR5/1); franco arcilloso; estructura en bloques subangulares medios, moderadamente bien desarrollados; consistencia

friable, ligeramente pegajoso y ligeramente plástico; pocos poros medios y finos de forma tubular; se observan pocos pedotúbulos y nódulos del mismo color de la matriz del suelo; regular presencia de macroorganismos y de raicillas; límite gradual y plano.

24 - 47 cm

Ah

Gris muy oscuro (10YR3/1) húmedo y gris oscuro (10YR4/1) seco; arcilloso; estructura en granulos medios y finos; moderadamente bien desarrollados; consistencia friable, pegajosa y plástica; frecuentes poros gruesos, medios y finos de forma tubular; pocos pedotúbulos y nódulos del mismo color de la matriz, regular presencia de lombrices; pocas raíces y raicillas; límite granular y plano.

47 - 100 cm

BA

Pardo grisáceo oscuro (10YR4/2) húmedo con pequeñas manchas - (30%) de color oliva (5Y4/3) y otras de color pardas amarillentas claras (10YR3/4); franco arenoso; bloques subangulares medios a finos muy débilmente desarrollados; consistencia muy friable, no pegajosa y no plástica; frecuentes poros medios y gruesos de forma tubular y continuos frecuentes pedonódulos del mismo color de la matriz del suelo; escasas lombrices y no hay raíces ni raicillas; límite gradual y plano.

100 - 150 cm

Bs

Oliva (5Y4/3) húmedo, con frecuentes manchas pardas a pardas oscuras (7.5YR4/4) bien nítidas; franco limosa; estructura en bloques subangulares, medios a finos muy débilmente desarrollados; consistencia muy friable, ligeramente pegajoso y ligeramente plástico; frecuentes poros de diámetro medio y fino de

forma tubular; no hay macroorganismos y no hay raíces ni raicillas.

PERFIL No. 4

Profundidad efectiva: Muy profundo

Drenaje natural: Bien drenado

Relieve: Plano con pendiente 0.1%

Descripción

- | | |
|------------|---|
| 00 - 28 cm | Gris muy oscuro (10YR3/1) húmedo; estructura en granulos medios bien desarrollados; consistencia firme, ligeramente pegajosa y ligeramente plástica; frecuentes poros finos; abundantes raíces y raicillas; frecuentes lombrices; reacción débil al HCl; límite gradual y plano. |
| Ap | |
| 28 - 43 cm | Gris muy oscuro (10YR3/1); estructura en granulos medios, moderadamente bien desarrollados; consistencia firme, ligeramente pegajoso y ligeramente plástico; pedotúbulos y nódulos frecuentes de color gris muy oscuro (2.5Y4/3); frecuentes lombrices, raíces y raicillas; reacción débil al HCl, en la masa del horizonte; límite gradual y plano. |
| Ah | |
| 43 - 63 cm | Oliva (5Y4/4) húmedo, frecuentes manchas pequeñas de color gris muy oscuro (5Y3/1) sobre las caras de los pedos, bolsas localizadas y nódulos del mismo color de la matriz del suelo; pequeñas manchas tenues en poca cantidad de color pardo amarillento oscuro (10YR3/4); franco arcillo limoso; estructura en bloques subangulares medios y débilmente desarrollados; consis |
| BA | |

tencia muy friable, no pegajosa y no plástica; abundantes poros finos y frecuentes pedotúbulos del color de la matriz; no hay macroorganismos, no hay raíces ni raicillas; reacción muy fuerte al HCl en la masa del horizonte; límite gradual y plano.

63 - 79 cm

Bs

Cliva (5Y4/3) húmedo con pequeñas manchas frecuentes de color cliva pálido (5Y6/4) bien clara; canalículos en forma ramificada de color pardo oscuro (10YR3/3); franco limosa; estructura en bloques subangulares medios y muy débilmente desarrollados; consistencia muy friable no pegajosa y no plástica; frecuentes concreciones pequeñas que reaccionan al HCl; no hay macroorganismos y no hay raíces ni raicillas; límite gradual y plano.

79 - 150 cm

C

Oliva (5Y4/4) húmedo, con frecuentes manchas pequeñas netas y medianas de color pardo amarillento oscuro (10YR3/4) y otras similares pero de color pardo a pardo oscuro (7.5YR4/4); franco limosos; de aspecto masivo; con concreciones de carbonatos de calcio; se pueden observar dentro del horizonte los contactos de las capas de sedimentación.